

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

АКАДЕМИЯ НАУК СССР



ПЕРВЫЕ ПАНОРАМЫ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ГЕОХИМИИ
И АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

им. В. И. ВЕРНАДСКОГО . 4

ПЕРВЫЕ ПАНОРАМЫ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

МОСКВА 1979

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
М. В. Келдыш	
I ПЛАНЕТА ВЕНЕРА	7
Л. В. Ксанфомалити	
II ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ПО РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ И РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ	13
А. Д. Кузьмин	
III ОСВЕЩЕННОСТЬ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ, ИЗМЕРЕННАЯ АМС «ВЕНЕРА-8»	19
М. Я. Маров	
IV МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ИСПОЛЬЗОВАВШИЕСЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ	24
А. С. Панфилов, А. С. Селиванов	
V АВТОМАТИЧЕСКИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ СТАНЦИИ «ВЕНЕРА-9» и «ВЕНЕРА-10»	38
А. Л. Львов, А. А. Пилат, А. Л. Александров, С. С. Соколов, В. Н. Турчанинов, М. И. Михайлов, Ю. И. Федоров, В. И. Гусляков	
VI ТЕЛЕВИЗИОННАЯ АППАРАТУРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	45
ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА СТАНЦИЯХ «ВЕНЕРА-9» и «ВЕНЕРА-10»	45
А. С. Селиванов, В. П. Чемоданов, М. К. Нараева, А. С. Панфилов, А. С. Титов, И. Ф. Сипельникова, А. Г. Шабанов, М. А. Герасимов, И. Т. Кобзева	
ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ	57
В. В. Засецкий, В. В. Нестеренко, А. М. Трахтман, В. П. Чемоданов	
АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ	63
Ю. С. Тюфлин, Л. М. Кадничанская	

VII	ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАНОРАМ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ	68
	А. С. Селиванов, А. С. Панфилов, М. К. Нараева, В. П. Чесоданов, М. И. Бохонов, М. А. Герасимов	
VIII	ОБРАБОТКА И ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОСАДОЧНЫХ АППАРАТОВ АМС «ВЕНЕРА-9» и «ВЕНЕРА-10»	80
	Б. В. Непоклонов, Г. А. Лейкин, А. С. Селиванов, Л. П. Ярославский, Е. П. Алексакин, И. М. Бокштейн, М. А. Кронрод, П. А. Чочиа	
IX	РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПАНОРАМ ВЕНЕРЫ	107
	К. И. Флоренский, А. Т. Базилевский, А. А. Прония, Г. А. Бурба	
X	НЕКОТОРЫЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ	128
	В. И. Мороз	

ПЕРВЫЕ ПАНОРАМЫ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

Утверждено к печати

ордена Ленина

Институтом геохимии и аналитической химии

им. В. И. Вернадского

Академии наук СССР

✱

Редактор Ю. И. Ефремов. Редактор издательства. Э. С. Павлинова

Художник А. Г. Кобрин. Художественный редактор Т. П. Поленова

Технический редактор Л. В. Каскова. Корректор Н. М. Вселюбская

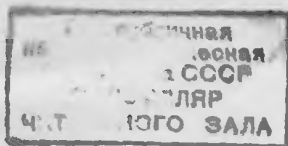
✱

ИБ № 76-9

Сдано в набор 25.08.78. Подписано к печати 20.03.79. Т-01487. Формат 70×100^{1/16}. Бумага для глубокой печати. Гарнитура обыкновенная. Печать высокая. Усл. печ. л. 11,61. Уч.-изд. л. 10,9. Тираж 1600 экз. Тип. Зак. 887. Цена 1 р. 70 к.

Издательство «Наука» 117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 94а

2-я типография издательства «Наука» 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10



к2 Э-49-41352
2657

Первые панорамы поверхности Венеры. М., «Наука», 1979.

В книге описан эксперимент по фотографированию поверхности Венеры станциями «Венера-9» и «Венера-10», а также результаты исследования полученных панорам.

Дан обзор современных представлений о Венере и результатов предыдущих исследований; описаны конструкция спускаемых аппаратов, схема спуска и передачи информации; приведено описание телевизионной аппаратуры и методов цифровой обработки изображений.

Книга представляет интерес для планетологов, геофизиков, специалистов по космической технике и студентов соответствующих специальностей.

Табл. 2, ил. 85, список лит. 69 назв.

Ответственный редактор
академик М. В. КЕЛДЫШ

Новый выдающийся успех в изучении планеты Венера, достигнутый в результате полета автоматических межпланетных станций «Венера-9» и «Венера-10», — замечательное свидетельство творческого гения нашего народа, крупный вклад в прогресс всего человечества.

Полеты автоматических станций «Венера-9» и «Венера-10» имеют важное научное значение. Впервые на орбиты вокруг Венеры выведены два искусственных спутника, произведена мягкая посадка двух спускаемых аппаратов в различных районах планеты. Тем самым осуществлен сложный комплексный эксперимент по изучению характеристик этой планеты на поверхности, в атмосфере, облачном слое и в окружающем космическом пространстве. Это чрезвычайно важно для понимания современных природных условий на Венере, источников их происхождения и физических процессов, способствующих их поддержанию.

Следует отметить не только комплексный характер измерений, но и применение разных методов, что существенно расширяет объем получаемых данных и повышает их достоверность.

Станции «Венера-9» и «Венера-10» — это новое поколение наших космических автоматов. В определенном смысле у них есть общие черты со станциями, запускавшимися нами к другой планете, к Марсу. Однако они принципиально отличаются от предыдущих станций прежде всего по конструкции спускаемых аппаратов. Это и понятно: условия в атмосферах и на поверхностях Венеры и Марса совершенно различны, что предъявляет разные требования к выбору схемы спуска и посадки на поверхность и обеспечению работоспособности бортовых систем.

Венера обладает исключительно плотной, сильно разогретой атмосферой, благодаря чему нелегко обеспечить необходимые условия для функционирования аппаратуры. Это требует принятия специальных мер для создания благоприятного теплового режима внутри аппарата. Преодоление этих трудностей на станциях «Венера-9» и «Венера-10» стало возможным благодаря опыту успешных полетов их предшественниц — станций «Венера-4—8».

Принципиально новым в этих экспериментах было то, что исследования проводились на освещенной стороне планеты, вблизи подсолнечной точки, где спускаемые аппараты с Земли непосредственно не видны. Поэтому передать с них научную информацию можно только через спутник-ретранслятор. Орбиты искусственных спутников были выбраны таким образом, чтобы обеспечивались условия радиовидимости между спускаемым аппаратом, спутником и наземными станциями приема информации в течение всего времени работы аппарата в атмосфере и на поверхности.

Была изменена схема спуска аппаратов в атмосфере. Нужно было выполнить два противоположных требования: с целью изучения облачного слоя медленно опускаться на большой высоте, где плотность атмосферы сравнительно невелика, и в то же время быстро пройти основную толщу атмосферы, с тем чтобы аппарат не успел сильно нагреться. С этой целью ввод парашютной системы после аэродинамического торможения осуществлялся на высоте около 65 км, где лежит верхняя граница облаков. Затем на высоте около 50 км основные парашюты отделялись, и дальнейший спуск происходил на аэродинамическом конусе, так что к моменту касания поверхности скорость аппарата уменьшалась до 7—8 м/с. За счет относительно малого времени спуска в горячей атмосфере, а также специально принятых мер по захлаживанию при подлете к планете температура внутри спускаемого аппарата на момент посадки не превышала 15° С. В результате этого работа на поверхности планеты всех систем и научной аппаратуры продолжалась более часа, в течение сеанса связи с искусственным спутником в зоне его радиовидимости.

Одной из важнейших задач спускаемого аппарата при его нахождении на поверхности было получение фототелевизионного изображения. Это выдвинуло требование принять необходимые меры, чтобы уменьшить вероятность опрокидывания аппарата. С этой целью посадка осуществлялась на специальное опорное кольцо, которое одновременно служило и амортизирующим устройством.

Надо сказать, что мы не ожидали столь сложный рельеф, какой видим на панорамах, переданных с поверхности Венеры. Ожидалось, что поверхность более выровненная. То, что спускаемые аппараты выдержали трудный экзамен даже в условиях посадки на каменистую поверхность, как это было в случае «Венеры-9», когда угол наклона аппарата составил почти 30° от вертикали, свидетельствует о высокой надежности принятой посадочной схемы.

На спускаемых аппаратах был установлен большой комплекс научной аппаратуры. Из полученной информации прежде всего следует выделить две панорамы поверхности Венеры. Телекамеры позволили взглянуть на ландшафт планеты в непосредственной близости, увидеть, что же представляет собой этот чужой и во многом удивительный мир. Сразу возник ряд вопросов. Каков возраст скальных пород, какова природа каменистой осыпи, в чем сходство и различие двух отснятых районов планеты, наконец, какие процессы в геологическом прошлом Венеры создали наблюдаемые сейчас ландшафты? По ним нет еще единого мнения. Это и не удивительно, ведь до сих пор нет однозначного ответа и на вопросы об эволюционных процессах, формирующих нашу Землю. Изучение соседних миров помогает лучше понять историю Земли, эволюцию всей планетной системы.

Станция «Венера-4» в 1967 г. впервые проникла в атмосферу планеты, под слой мощных облаков, и произвела непосредственные измерения ее температуры, давления, химического состава. В результате ряда дальнейших экспериментов на космических аппаратах этой серии удалось существенно уточнить параметры атмосферы, надежно рассчитать ее модель. Однако предыдущие измерения проводились вблизи границы дня и ночи, т. е. в условиях, не характерных для всей атмосферы.

Эксперименты на станциях «Венера-9» и «Венера-10» дали сведения, необходимые для уточнения характеристик атмосферы, о величине их суточных изменений, что имеет важное значение для понимания особенностей теплового режима и динамики атмосферы планеты. Для измерения скорости ветра использовались как непосредственные измерения скорости ветра, так и данные о доплеровском изменении частоты генератора бортового радиопередатчика спускаемого аппарата. Кроме того, для изучения характера планетарной циркуляции и движений в атмосфере используется перемещение облачных структур, регистрируемых с орбит искусственных спутников в ультрафиолетовых лучах.

Получение изображения с поверхности Венеры стало возможным благодаря выводу о достаточной освещенности поверхности, сделанному в результате успешного полета станции «Венера-8». Измерения величины светового потока показали, что солнечный свет, хотя и в большой мере ослабленный, проникает до поверхности сквозь плотную, сильно рассеивающую атмосферу и облака. Эти эксперименты были продолжены на аппаратах «Венера-9» и «Венера-10», на которых были установлены усовершенствованные приборы, обеспечившие измерения потоков солнечного излучения в отдельных спектральных интервалах, от синего до ближнего инфракрасного. Это позволило более определенно судить о свойствах среды, через которую проходит солнечный свет, более надежно оценить характер его ослабления и световой режим у поверхности. Возможность регистрации потоков радиации из верхней и нижней полусфер позволила надежнее оценить энергетический баланс в атмосфере на разных уровнях и отражательные свойства поверхности Венеры. Наряду с этими измерениями проводились также измерения поглощения радиации в отдельных полосах углекислого газа, водяного пара и в ближней инфракрасной области спектра, что дает оценки относительного содержания водяного пара в атмосфере и вместе с тем позволяет независимо исследовать характер прозрачности атмосферы по высоте.

Исключительно большой интерес вызывают облака Венеры. Из чего они состоят, какова их толщина, меняется ли толщина облаков в течение венерианских суток — эти и другие вопросы еще ждут своего ответа. Вместе с тем впервые получена важная информация об их структуре и микрофизических характеристиках благодаря измерениям при помощи нефелометров. Эти приборы позволяют получить угловые зависимости рассеяния частиц облаков и тем самым дают возможность судить о свойствах самих частиц — размере, химической природе, плотности. Наряду с этим изучается вертикальная структура облачного слоя, «мутность» среды. Такие методы известны в практике метеорологических наблюдений в земных условиях, однако для исследования атмосфер планет, имеющих свою большую специфику, использованы впервые. Совокупность измерений при помощи обширного оптического комплекса, установленного на спускаемых аппаратах, несомненно позволит продвинуться вперед в понимании природы облаков на Венере.

Большой комплекс приборов был установлен на искусственных спутниках Венеры. Для исследования облачного слоя дистанционными методами использовались спектрометры, радиометры и фотополариметры. Изучался также спектр собственного излучения атмосферы с целью

определения ее состава и основных фотохимических процессов, магнитные поля и спектры ионов и электронов в околопланетном пространстве. Методом радиопросвечивания измерялась плотность ионов и электронов в ионосфере Венеры.

Конструкторам станций и научной аппаратуры пришлось преодолеть немало трудностей, выдвинутых сложностью и многими специфическими особенностями этого эксперимента. Следует отметить, что спускаемый аппарат с установленными на нем приборами является единым многофункциональным измерительным комплексом и сама его конструкция, по существу, представляет собой измерительный прибор. Действительно, при строго определенных аэродинамических характеристиках аппарата экспериментальные данные о его движении в атмосфере служат дополнительным источником информации о ее свойствах.

Надежность работы спускаемых аппаратов, искусственных спутников Венеры, всех бортовых систем и приборов была обеспечена в результате тщательной наземной отработки, в том числе испытаниями в условиях, имитирующих спуск в атмосфере и работу на поверхности планеты. Большой вклад в успешное осуществление этих экспериментов внесли специалисты наземного командно-измерительного комплекса, обеспечившие точное управление и прием информации на всех этапах полета автоматических станций.

За последнее десятилетие в изучении планет Солнечной системы достигнуты большие успехи. В результате полетов советских и американских космических аппаратов мы узнали много нового и порой неожиданного о природе ближайших планет — Венеры, Марса, Меркурия. Осуществлены первые полеты к Юпитеру. Автоматические аппараты обладают практически неограниченными возможностями в проведении сложнейших экспериментов непосредственно на планетах или вблизи их. Особенно убедительно это было продемонстрировано возможностями доставки лунного грунта, работой самоходных аппаратов на лунной поверхности, проведением серии различных измерений в чрезвычайно суровых климатических условиях на Венере. Получение многих данных из атмосферы и с поверхности Венеры другими средствами было бы просто невозможно.

Изучение планет — это необходимый этап в познании человеческого окружающего мира, в лучшем узнавании собственной планеты. Мы сейчас являемся свидетелями начала этого этапа. Космические исследования дали для этого в наши руки качественно новые возможности. Постепенное накопление сведений в этой области дает необходимые знания для решения одной из фундаментальных проблем современного естествознания — проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы.

Предлагаемая книга посвящена одному из наиболее интересных исследований, проведенных автоматическими станциями «Венера-9 и -10», — эксперименту по фотографированию поверхности Венеры, описанию его подготовки и условий проведения, первым результатам изучения панорам.

Венера — самое яркое светило на небе после Солнца и Луны — с древнейших времен привлекала внимание человека. Однако многовековые наблюдения планеты в оптическом диапазоне позволили получить о ней очень ограниченные сведения.

Из давних астрономы располагали сведениями о том, что длительность венерианского года составляет 224,7 дня и что планета находится в 1,4 раза ближе к Солнцу, чем Земля. Эксцентриситет ее орбиты очень мал (0,0068), орбита почти круговая; среднее расстояние от Солнца составляет 108,1 млн. км. Наклон орбиты к плоскости эклиптики $3^{\circ},5$. Венера — ближайшая к Земле планета, в максимальном сближении ее отделяет от нас только 40 млн. км. К сожалению, в этот период мы видим только почную сторону планеты. Спутников у нее нет.

По уточненным с помощью космических аппаратов данным, масса Венеры составляет $48,7 \cdot 10^{26}$ г, или 0,815 массы Земли, а ее радиус равен 6052 км, что также лишь немногим меньше среднего радиуса Земли (6371 км). Ускорение силы тяжести у поверхности планеты 887 см/с^2 . Средняя плотность Венеры ($5,24 \text{ г/см}^3$) незначительно отличается от средней плотности Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$). Такое сходство между двумя планетами позволяет предположить, что и внутреннее строение Венеры похоже на строение Земли.

В своем орбитальном движении планета иногда оказывается на линии между Солнцем и Землей, и тогда ее можно видеть как маленькую черную точку, пересекающую солнечный диск. В 1761 г. М. В. Ломоносов, наблюдая такое прохождение, обнаружил, что в момент контакта с Солнцем около внешнего (относительно Солнца) края планеты вспыхнул яркий ободок. Такая же картина повторилась, когда Венера сходила с солнечного диска. На основании этого Ломоносов сделал вывод, что Венера окружена плотной атмосферой. На диске Венеры при наблюдениях в визуальной и фотографической областях спектра незаметно никаких деталей вследствие наличия в атмосфере планеты облачного слоя, закрывающего ее поверхность от взгляда человека. Лишь в ультрафиолетовых лучах различимы слабые пятна и полосы.

В 50-е и 60-е годы нашего столетия благодаря развитию радиофизических методов исследования были определены период вращения Венеры, некоторые характеристики ее поверхности, уточнена величина радиуса планеты. По разнице в доплеровских сдвигах частот радиосигналов, отраженных правой и левой сторонами вращающейся планеты, был определен период ее вращения, он составляет около 243 земных суток, что практически совпадает с резонансным периодом системы Зем-

ля — Венера. Направление вращения обратное (планета вращается с востока на запад). Сложение двух движений, вокруг оси и вокруг Солнца, приводит к тому, что солнечные сутки на Венере длятся 118 земных суток. Результаты, полученные радиоастрономическими и радиолокационными методами, описаны в главе II.

Смена времен года на Венере отсутствует, поскольку наклон полярной оси не превышает 4° (по другим данным 1°).

Четырехсуточный период вращения, найденный по движению пятен и полос, наблюдаемых в ультрафиолетовых лучах, был подтвержден при наблюдениях с «Маринера-10». Этот период отражает движение облаков, скорость его относительно поверхности достигает 100 м/с.

Принципиально новым инструментом, неизмеримо расширившим возможности исследований, стали космические аппараты, позволившие приблизиться к планете, проникнуть в ее атмосферу и опустить на ее поверхность научные приборы. В 1967 г. советская автоматическая межпланетная станция «Венера-4» провела первые прямые исследования параметров атмосферы и ее состава, подтвержденные в ходе последующих полетов станций «Венера». Усовершенствованная конструкция позволила станциям «Венера-7» (1970 г.) и «Венера-8» (1972 г.) достигнуть поверхности соответственно на ночной и утренней сторонах планеты, при этом были получены данные о нижней атмосфере планеты вплоть до поверхности.

Станции «Венера-9» и «Венера-10», представляющие собой аппараты нового поколения, осуществили комплексный эксперимент — прямые измерения в 65-км толще атмосферы в двух районах (на дневной стороне), разделенных расстоянием приблизительно 2000 км, и фотографирование поверхности планеты со спускаемых аппаратов в сочетании с глобальными исследованиями самой планеты, ее облачного покрова, надоблачной атмосферы и околопланетного пространства с первых искусственных спутников Венеры.

На борту спутников наряду с комплексом научной аппаратуры имелся скапирующий телефотометр, который передавал изображения облачного слоя в тех районах, где проводились измерения яркости, контрастов, температуры, спектров и других его параметров. Измерения температуры облачного слоя дали среднее значение 240 ± 1 К, что позволило заметно уточнить радиометрическое альbedo Венеры: $0,79 \pm 0,02$ вместо $0,77 \pm 0,07$. Найдено также, что дневные температуры на $7-12^\circ$ ниже ночных, а небольшие неоднородности в температурном поле иногда коррелируют с деталями ультрафиолетового изображения, где получены контрасты от 3 до 16% на разных трассах. Интересно отметить, что по измерениям со спутников Венеры ее эффективная температура несколько ниже, чем эффективная температура Земли. На рис. 1 показан фрагмент изображения, переданного телефотометром «Венеры-9». Светлая полоса — один из спиральных рукавов глобальной структуры облачного слоя (см. снимок «Маринера-10», рис. 2).

Атмосфера Венеры существенно отличается от земной. В октябре 1967 г. космический аппарат «Венера-4» при спуске в атмосферу планеты непосредственно установил, что в основном она состоит из углекислого газа: не менее 97%. Окончательные данные о концентрации азота, кислорода и аргона пока отсутствуют. Спектроскопические наблюдения

с Земли показали, что над облаками и, вероятно, в их верхней части присутствуют соляная и плавиковая кислоты.

До полета «Венеры-4» сведения о давлении у поверхности планеты были очень противоречивыми. Максимальное давление, на которое были рассчитаны ее датчики, составляло $7,2 \text{ кг/см}^2$. Этого оказалось мало: на высоте 23 км, когда давление достигло $17,6 \text{ кг/см}^2$, аппарат разрушился. «Венера-5» и «Венера-6» имели более прочную конструкцию и работали до высот около 17 км, когда давление достигло 27 кг/см^2 . Первыми поверхности достигли «Венера-7» и «Венера-8», рассчитанные на давления 180 и 120 кг/см^2 соответственно. Были зарегистрированы огромные величины давления и температуры: 93 кг/см^2 и 477°C (по данным «Венеры-8»).

Углекислотная атмосфера планеты очень плотна. У поверхности Венеры плотность атмосферы в 70 раз выше, чем у земной поверхности, что только в 14 раз меньше плотности воды. Однако с высотой быстро падают плотность, давление, температура. Выше 150 км атмосфера Венеры уже более разрежена, чем атмосфера Земли на тех же высотах. Еще выше, где влияние турбулентного перемешивания уже невелико, диффузия вызывает изменение состава: более массивные молекулы углекислого газа остаются внизу, преобладают кислород и угарный газ (250—320 км); еще выше резко возрастает относительное содержание гелия и водорода (хотя, конечно, падает по абсолютной величине). С высоты 800 км начинается чисто водородная корона (от 1000 до 10 000 атомов на 1 см^3), которая постепенно переходит в межпланетную среду.

При визуальных наблюдениях мы видим только облачный слой планеты. Он настолько протяженный, что до полета «Венеры-8» в 1972 г. считалось вполне возможным, что на поверхности планеты темно. Спускаемый аппарат этой станции прошел сквозь огромную толщу венерианских облаков, которые простирались от высоты 70 до 30 км. Облака такой протяженности могут поглотить очень много света; величина поглощения зависит от оптических свойств рассеивающей среды, и прежде всего от того, консервативно ли рассеяние — сохраняется ли свет при рассеянии или поглощается. «Венера-8» опустилась в утреннем районе. Выяснилось, что на поверхности довольно светло. Когда же аппараты «Венера-9» и «Венера-10» совершили посадку на дневной стороне планеты, освещенность оказалась высокой — около 10 тыс. лк. Не исключено, что толща облачного слоя в полуденном районе намного меньше. Во всяком случае, нижняя граница облачности, которую «Венера-8» зафиксировала в 1972 г. так четко на высоте 30 км, в 1975 г. была несколько размыта и находилась выше, у 49 км.

Пока остается не вполне ясной природа венерианских облаков. Свойства облаков не удается объяснить предположением об их водной природе. Во-первых, спектроскопические исследования показали, что количество водяного пара в атмосфере Венеры невелико. Во-вторых, поляризметрические измерения позволили найти коэффициент преломления частиц в облаках, который составил 1,44 (для воды 1,33). Наконец, фазовая кривая поляризации говорит о жидких каплях, а температура в верхней части облаков составляет -40°C , что также исключает жидкую воду. Совокупность имеющихся данных об облачном слое

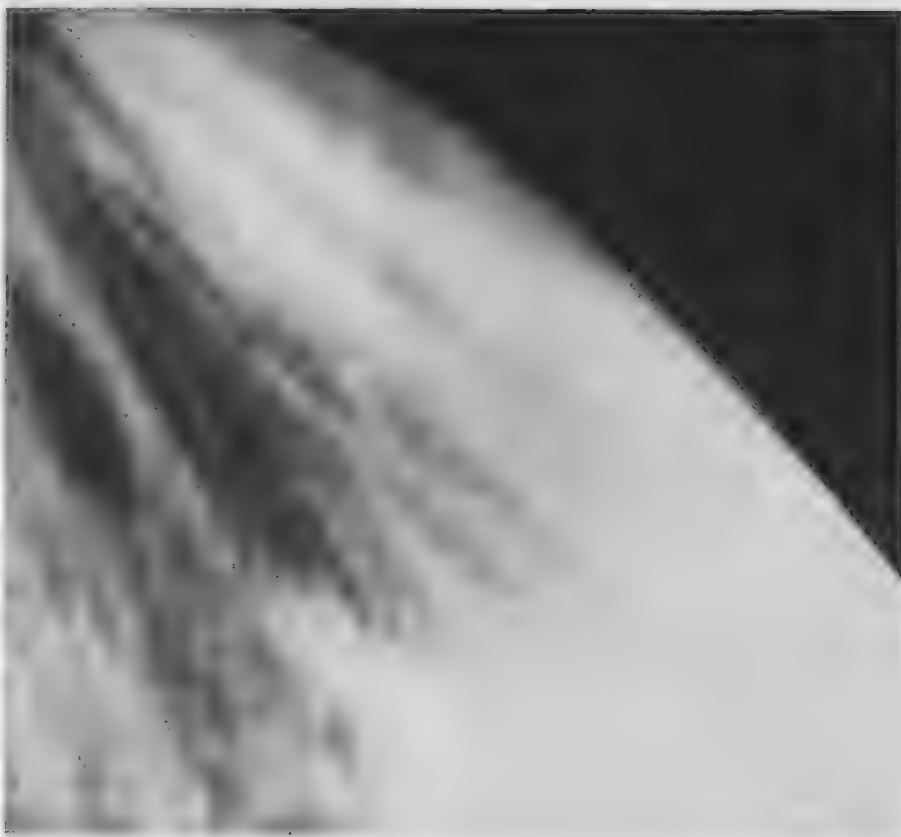


Рис. 1

Фрагмент изображения облачного слоя, переданного орбитальным аппаратом станции «Венера-9»

Изображение получено в ультрафиолетовых лучах

хорошо объясняется предположением о том, что облака состоят из капель концентрированной серной кислоты.

Содержание углекислоты в земной атмосфере составляет 0,032% (около $2,5 \cdot 10^{18}$ г). Но главные ее запасы растворены в Мировом океане, где ее в 50 раз больше, чем в атмосфере. Постоянный обмен углекислым газом между океаном и атмосферой демпфирует изменения ее концентрации в атмосфере. Еще больше связанной углекислоты находится в осадочных породах, $3,6 \cdot 10^{23}$ г. Однако обмен с осадочными породами требует в миллионы раз большего времени.

При высоких температурах на поверхности Венеры не может существовать жидкая вода, но ее роль берет на себя сама поверхность планеты, с которой углекислый газ вступает в реакции. На Земле эти реакции идут медленно из-за низкой температуры. Наоборот, на Венере их скорость очень велика. Равновесие с углекислым газом определяется



Рис. 2

Вид облачного покрова Венеры в ультрафиолетовых лучах

Спиральные полосы, сходящиеся в центре, образуют стороны Y-образной фигуры, наблюдавшейся с Земли (снимок «Маринера-10»)

обратимыми реакциями между силикатами и карбонатами (типа так называемого волластонитового равновесия). Равновесными реакциями, по-видимому, объясняется и наличие в атмосфере серной, соляной и плавиковой кислот. Ожидаемое общее количество серной кислоты в атмосфере Венеры не противоречит обилию серы в вулканических газах и на поверхности Земли. Серная кислота в очень незначительных количествах появляется и в атмосфере Земли, но быстро растворяется в воде и выпадает с осадками.

При сходстве в составе, массе и размерах и близких количествах паров воды в атмосфере Земли и Венеры Земля имеет океаны, содержащие огромное количество воды, $1,4 \cdot 10^{24}$ г. Наиболее вероятное объяснение сухости Венеры связано с высокой температурой у ее поверхности. Возможно следующее представление об эволюции атмосферы планеты. Состав атмосферы Венеры (как и дру-

гих планет), вероятно, определился на довольно поздней стадии ее формирования. Начало вулканической деятельности привело к появлению первичной атмосферы из паров воды и углекислоты (в отношении примерно 5 : 1). Водяной пар, как и углекислота, обладает одним важным свойством: он прозрачен в оптическом, но мало прозрачен в инфракрасном диапазоне. Это значит, что солнечные лучи легко достигали поверхности и поглощались ею. Но если при этом планета не становилась горячее, если она находилась в тепловом равновесии, вся поглощенная энергия снова излучалась в космос, но уже в другом, инфракрасном диапазоне, 3—15 мкм, с максимумом излучения у 4 мкм. Но именно в этом диапазоне атмосфера перехватывает значительную часть излучения. По-видимому, и начальная температура «первозданной» Венеры из-за ее сравнительной близости к Солнцу была довольно высока, но описанный «парниковый эффект» еще больше ускорял выделение из поверхности воды и углекислоты. Все это привело к тому, что моря и океаны на планете не смогли образоваться из-за высокой температуры, а вода, уходявшая в атмосферу, еще больше усиливала «парниковый эффект». По-видимому, этому процессу сопутствовала довольно быстрая потеря планетой водорода, который «убегал» в космос из горячей атмосферы. Воды в атмосфере Венеры почти не осталось. Для сравнения укажем, что, если испарить океаны Земли, давление в ее атмосфере поднимется до 300 кг/см².

Венера обладает ионосферой. Концентрация электронов в ней достигает днем $5 \cdot 10^5$ электрон/см³, а ночью снижается примерно в 50 раз. У ионосферы Венеры есть особенность: поскольку здесь отсутствует магнитное поле, плазма солнечного ветра воздействует на нее непосредственно, сжимая верхнюю границу дневной ионосферы примерно до 530 км. Это явление пока неизвестно нигде больше.

Отсутствие магнитного поля у Венеры выделяет ее из планет земной группы. У Меркурия есть довольно сильное магнитное поле — около $4 \cdot 10^{-3}$ Э. Поле с напряженностью около $0,7 \cdot 10^{-3}$ Э имеется, по-видимому, и у Марса. Сильным магнитным полем обладает Земля. У Венеры и Земли близки размеры, средняя плотность, вероятно, и строение недр. Почему же у Венеры практически нет магнитного поля? По одной из современных теорий, величина напряженности дипольного магнитного поля планеты зависит от прецессии полярной оси, угловой скорости ее вращения и ряда других параметров. Слабое дипольное поле Венеры отвечает этим представлениям.

На панорамах «Венеры-9» и «Венеры-10» мы впервые увидели поверхность планеты — два очень несхожих региона. «Венера-10» опустилась на обширную плоскую каменную плиту, какие встречаются и на некоторых плоскогорьях Земли. Кое-где плита расколота, но части ее не смещены. Впадины заполнены, по-видимому, мелкой щебенкой. Измерения говорят о составе грунта, характерном для базальта. Иная картина была передана спускаемым аппаратом «Венеры-9». Здесь мы видим в изобилии камни, однако это отдельные глыбы, лежащие на мелкой щебенке.

Результаты детального фотометрического и геолого-геоморфологического анализа этих панорам приведены в главах VI—X настоящей книги.

Непосредственное доказательство радиоизлучения поверхности было получено А. Д. Кузьминым и Б. Кларком, которые в 1964 г. обнаружили поляризацию радиоизлучения Венеры на волне около 10 см. Факт поляризации определенно указал, что излучение обусловлено поверхностью, а не атмосферой или ионосферой. Это позволило определить температуру поверхности планеты $T_{\text{п}} = 650 \pm 70$ К. Вышеупомянутые измерения производились около нижнего соединения Венеры, когда планета сближается с Землей на минимальное расстояние. При этом к Земле обращена темная, не освещенная Солнцем сторона Венеры. Поэтому указанная температура 650 К относится к ночной стороне Венеры.

Первые сведения о температуре поверхности дневной стороны Венеры были получены также путем радиоастрономических измерений на основе измерения около верхнего соединения. Трудность такого измерения заключается в том, что расстояние до Венеры в верхнем соединении примерно в 6 раз больше, и поэтому интенсивность принимаемого радиоизлучения примерно в 40 раз меньше, чем в нижнем соединении. Измерения Ф. Дрейка, А. Кузьмина и К. Келлермана на волне около 10 см показали, что различие температур поверхности Венеры днем и ночью не превышает 30 К.

Высокая температура поверхности в корне изменила существовавшие ранее представления о Венере как о планете — близнеце Земли, условия на которой близки к земным. В частности, невозможность существования при такой температуре белков исключила весьма заманчивую возможность жизни на Венере, по крайней мере на ее поверхности.

Высокая температура поверхности усложнила также задачу создания космических аппаратов для спуска в ее атмосферу и посадки на поверхность. В частности, выявилась необходимость использования системы теплозащиты и применения термостойкого материала для парашюта.

Таким образом, радиоастрономические измерения температуры поверхности Венеры явились также основой для дальнейшего более детального и всестороннего изучения планеты со спускаемых космических аппаратов «Венера».

Для определения условий посадки на поверхность Венеры необходимо также знать радиус и фигуру планеты, плотность материала и микрорельеф поверхности.

Первое измерение радиуса поверхности планеты было проведено А. Д. Кузьминым и Б. Кларком в 1964 г. На основе интерференционных радиоастрономических измерений с высоким угловым разрешением они получили $R_{\varphi} = 6057 \pm 55$ км. Последующие радиолокационные измерения позволили уточнить этот параметр и значительно уменьшить ошибку его определения. С разбросом около 2 км средний экваториальный радиус Венеры равен 6050 км. Фигура планеты измерялась с помощью радиолокации. В экваториальной плоскости сечение планеты аппроксимируется эллипсом, разность полуосей которого составляет $1,1 \pm 0,4$ км. Большая ось эллипса составляет угол 55° (по часовой стрелке) с направлением на Землю в нижнем соединении. Центр фигуры смещен относительно центра масс на $1,5 \pm 0,3$ км.

Радиолокационная астрономия изучает небесные тела, исследуя

отраженное ими радиоизлучение, создаваемое и направляемое на эти тела специальными радиопередающими системами. В применении к планетам анализ отраженного радиоизлучения кроме упомянутого уже определения радиуса и фигуры дает также возможность определить диэлектрическую проницаемость материала, рельеф и характер неровностей поверхности планеты. По величине диэлектрической проницаемости можно определить плотность материала поверхности.

Определение диэлектрической проницаемости материала поверхности и характера неровностей поверхности производится на основе измерения интенсивности, характера и величины рассеяния отраженного сигнала.

На основе известного радиолокационного уравнения

$$P_o = P_n \frac{GAS_o}{(4\pi r^2)^2},$$

где P_n и P_o — мощность, излучаемая передатчиком, и принимаемая отраженная мощность, G — коэффициент усиления передающей антенны, A — эффективная площадь приемной антенны, r — расстояние до отражающего тела, можно определить эффективное сечение отражающего тела

$$S_o = \frac{(4\pi r^2)^2}{GA} \frac{P_o}{P_n}.$$

Для отражающего шара радиуса R

$$S_o = gR_n(\pi R^2),$$

где g — коэффициент направленности отраженного радиоизлучения, R_n — коэффициент отражения для нормального падения.

Для диэлектриков с малыми потерями, что справедливо для большинства силикатных пород,

$$R_n = \left(\frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{\sqrt{\epsilon} + 1} \right)^2,$$

откуда

$$\epsilon = \left(\frac{1 + \sqrt{R_n}}{1 - \sqrt{R_n}} \right)^2.$$

Первые успешные радиолокационные измерения Венеры были проведены в 1961 г. в СССР группой сотрудников Института радиотехники и электроники АН СССР под руководством академика В. А. Котельникова, в Англии на радиоастрономической обсерватории Джодрелл-Бэнк и в США в Линкольнской лаборатории Петтенгиллом и др. и в лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института.

В ходе этих и последующих экспериментов была определена диэлектрическая проницаемость материала поверхности $\epsilon = 4,7 \pm 0,8$. Близкую к этому величину $\epsilon = 3,6 \pm 1,0$ получили А. Д. Кузьмин

и Б. Кларк другим методом на основе измерения величины поляризации собственного радиоизлучения Венеры. Используя полученную В. Д. Кротиковым для сухих силикатных пород эмпирическую зависимость, связывающую плотность ρ и диэлектрическую проницаемость,

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon} - 1}{0,5},$$

получим для поверхности Венеры $\rho = 2,3 \pm 0,4$ г·см⁻³, что близко к плотности земных пород. Это дает основание полагать, что материал поверхности Венеры аналогичен сухим земным поверхностным породам.

Значительно меньшая плотность поверхности пород, чем средняя плотность планеты в целом (5,2 г·см⁻³), дает основание полагать, что Венера, так же как и Земля, прошла стадию дифференциации, в процессе которой образовалась более легкая сравнительно с глубинными слоями кора.

Разумеется, необходимо учитывать, что диэлектрическая проницаемость и плотность, полученные из радиолокационных и радиоастрономических измерений, являются усредненными по всему видимому полушарию планеты. Поэтому приведенная выше плотность является средней плотностью поверхностных пород Венеры.

Радиолокационные измерения с высоким разрешением показали, что на поверхности Венеры действительно есть области повышенного отражения (см. рис. 1). По движению этих областей были получены наиболее точные данные об элементах вращения Венеры. Период вращения планеты равен $243,0 \pm 0,1$ земных суток, т. е. очень близок к периоду резонансного вращения Венеры относительно Земли (243,16 земных суток). При этом в каждом нижнем и верхнем соединении Венеры всегда обращена к Земле одна и та же сторона. Направление оси вращения близко к перпендикуляру к плоскости орбиты планеты. Поэтому сезонные вариации, аналогичные земным временам года, на Венере не должны быть сильно выражены.

Повышенное отражение может быть обусловлено различием материала поверхности, локальной возвышенностью и более неровной фактурой поверхности.

Дальнейшее повышение разрешающей способности радиолокационных измерений Венеры до 10 км на поверхности планеты в области диаметром 1500 км позволило выявить более десяти кольцевых кратеров диаметром от 35 до 150 км, подобных кратерам на Луне, Марсе и Меркурии. Кратеры на Венере мелкие. Так, например, кратер диаметром 150 км имеет глубину около 0,5 км. Возможно присутствие более мелких кратеров и других деталей рельефа, не обнаруженных из-за ограниченной разрешающей способности.

Измерения рельефа с меньшим разрешением (от 200 до 400 км) проведены радиолокационным методом по всей экваториальной области Венеры между широтами от -9 до $+10^\circ$. Наиболее примечательной является возвышенная область высотой около 3 км над уровнем средней поверхности, соответствующей радиусу 6050 км. Протяженность области по долготе около 6000 км и по крайней мере 500 км по широте. Склоны этой возвышенности неодинаковы. В сторону уменьшения дол-

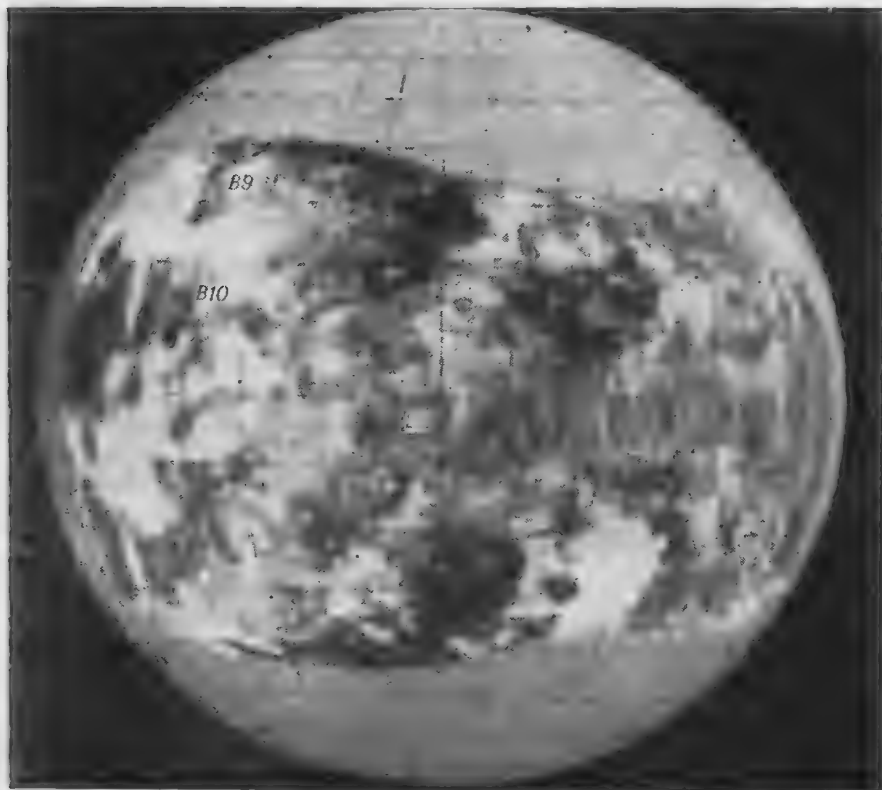


Рис. 1

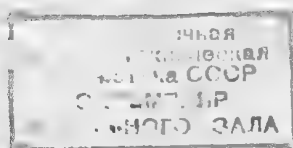
Радиолокационная карта одного полушария Венеры

Этим полушарием Венера обращена к Земле во время нижних соединений. Белое пятно справа внизу — область Альфа с повышенным радиоотражением. Через область Альфа проходит меридиан 0° . Координатная сетка проведена через 10° по широте и долготе. Север вверху. B8, B9, B10 — места посадок станций «Венера-8, -9 и -10»

готы склон пологий — средний угол около $0^\circ,04$. В сторону увеличения долготы склон значительно более крутой — средний угол около $0^\circ,5$.

Следует отметить, что определенный таким образом по радиолокационным измерениям рельеф является усредненным по большой области и сглаженным за счет усреднения. Поэтому фактические перепады высот могут быть значительно больше и соответствовать горам высотой 6—10 км. Однако в связи с высокой температурой поверхности кора Венеры должна быть более подвижной, чем земная, и поэтому по условиям изостазии наличие на Венере гор такой высоты представляется маловероятным.

Радиолокационные измерения рельефа относятся лишь к экваториальной части планеты. Никаких данных о рельефе остальной части поверхности нет.



Анализ направленности радиолокационного отражения дает возможность сделать также некоторые заключения о микрорельефе поверхности Венеры. Как известно, от гладкой (в масштабе длины волны) поверхности отражение зеркальное — угол падения равен углу отражения. Поэтому, в частности, на спокойной водной поверхности отраженные Солнце или Луна видны без искажений. На волнистой поверхности воды возникает много зеркальных отражений, приводящих к появлению лунной дорожки. По величине этой дорожки можно оценить волнистость воды. «Размытие» радиолокационного отражения от Венеры указывает на присутствие на поверхности планеты наклонных гладких (в масштабе длины волны) участков размером больше 1 м. Среднеквадратичный угол отклонения этих участков от сферы составляет $6-8^\circ$. Для Луны аналогичный угол равен 10° , т. е. неровности рельефа Венеры меньше, чем Луны.

Небольшая часть падающего излучения отражается диффузно во все стороны. Это свидетельствует о наличии на поверхности мелких деталей размером меньше длины волны, т. е. меньше 10 см. Суммарная площадь таких участков составляет примерно 5% площади поверхности планеты.

До недавнего времени результаты наземных наблюдений, определяющие интегральные оптические свойства планеты (спектральные, фотометрические и поляризационные характеристики, распределение яркости по диску, изменение визуальной фазовой кривой), были единственным источником сведений о распространении солнечного света на Венере. Эти результаты не позволяли получить однозначного ответа на вопросы об относительной роли рассеяния и поглощения радиации в атмосфере и облаках, о структуре облаков, содержании и природе аэрозоля. Тем более невозможно было получить на основе этих данных оценки оптического режима в глубоких слоях атмосферы, и в частности об освещенности у поверхности планеты, поскольку основная доля фотонов, обуславливающих наблюдаемые отражательные характеристики Венеры, очевидно, не проникает ниже видимой границы облаков на оптическую толщину свыше 2—3, что составляет не более нескольких сот метров.

Как следствие рассматривались две альтернативных модели, согласно одной из которых определенная доля солнечного света достигает поверхности, а согласно другой — полностью задерживается в толще облаков и атмосферы. В последнем случае нужно было ожидать, что у поверхности Венеры царит вечный сумрак, и о фотографировании поверхности без искусственной подсветки не могло быть и речи. Необходимы были экспериментальные данные, чтобы дать ответ на этот принципиальный вопрос и сделать выбор между двумя моделями.

Для специфических условий Венеры прямые измерения светового потока от Солнца представляют, по существу, единственную возможность надежного определения зависимости его ослабления по мере проникновения в глубь атмосферы. Помимо определения освещенности это имеет также принципиально важное значение для установления энергетического баланса в атмосфере и выяснения причины ее разогрева, определения структуры облаков. Конечно, оптические измерения в условиях горячей плотной атмосферы Венеры представляют большие трудности. 22 июля 1972 г. такой эксперимент впервые был осуществлен на автоматической станции «Венера-8». Измерения проводились при помощи фотометра с осесимметричной диаграммой направленности и сернистокадмиевым фотосопротивлением в качестве приемника. Максимум спектральной характеристики фотометра был около 6600 Å, ширина ее по уровню 0,5 около 2000 Å. Регистрировалось излучение из верхней полусферы в процессе спуска аппарата от высоты 50 км до поверхности. Угол Солнца над горизонтом в месте посадки аппарата составил $\theta = 5,5 \pm 2^\circ,5$.

Результаты измерений величины и характера ослабления потока солнечной лучистой энергии позволили прежде всего сделать чрезвычайно важный вывод о том, что солнечный свет, хотя и сильно ослабленный, проникает до поверхности, что у поверхности Венеры довольно светло. Измеренная величина лучистого потока в месте посадки оказалась около 1 Вт/м^2 , что в пересчете с учетом спектральной чувствительности фотометра и лабораторных измерений эквивалентной освещенности составляет около 400 лк. Поток солнечной энергии на верхнюю границу атмосферы Венеры при угле Солнца $5,5 \pm 2^\circ,5$ равен $25,9 \pm 11,8$ клк. Отсюда следует, что величина лучистого потока от Солнца, достигающего поверхности планеты, находится в пределах от 1,1 до 2,8% (номинальному углу $\theta = 5^\circ,5$ соответствует 1,5%). Поскольку альbedo Венеры в видимой области составляет около 80%, это означает, что ослабление света атмосферой и облаками достигает почти 20%.

Измерения «Венеры-8» показали также, что солнечный свет ослабляется в атмосфере неравномерно, что оптическая плотность атмосферы убывает с ростом молекулярной плотности. Ослабление в слое ниже 35 км в пределах 30% обуславливается релеевским рассеянием в углекислой атмосфере, а выше заметное влияние должен оказывать аэрозоль. Вероятное альbedo поверхности было оценено равным $\sim 0,2$. Из сопоставления с солнечной постоянной для Венеры с первыми показаниями фотометра следовало, что в области выше 50 км происходит ослабление света примерно в 7 раз, между 50 и 35 км примерно в 3 раза и ниже 35 км приблизительно вчетверо.

Расчеты с использованием уравнения переноса излучения в приближении Шварцшильда, обобщенном на случай неізотропного рассеяния, позволили подобрать модель двухслойной атмосферы, наилучшим образом удовлетворяющую результатам измерений. Было показано, что слой ниже 35 км слабо запылен, а слой выше 35 км, вероятнее всего, характеризуется почти консервативным рассеянием, значительный вклад в которое вносят аэрозоли. Оптическая толщина верхнего слоя была оценена равной $\tau \approx 50$ при альbedo однократного рассеяния $\omega_0 \leq \leq 0,999$ и сравнительно вытянутой индикатрисе. Предположительная переходная область вблизи 35 км была отождествлена с нижней границей облачности в ранние утренние часы, соответствовавшие району спуска и посадки «Венеры-8». Для полученной оптической толщи верхнего слоя коэффициент объемного рассеяния составил $\sigma \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$, число частиц микронного размера — от нескольких десятков до нескольких сот в 1 см^{-3} .

Для получения изображения с поверхности Венеры необходимо было оценить степень освещенности в местах предполагаемой посадки аппарата, а также величины ожидаемых контрастов.

Освещенность у поверхности Венеры при большой оптической толщине ее атмосферы и облаков соответствует световому режиму в глубоких слоях. Можно допустить, что интенсивность излучения, пропущенного такой атмосферой, не зависит от азимута, а относительное распределение интенсивности по углам слабо зависит от глубины и в случае малого истинного поглощения распределено практически так же, как и в случае чистого рассеяния. Очевидно, роль прямого излучения

пренебрежимо мала по сравнению с определяющим глубинный световой режим диффузным излучением.

Для описания поля излучения поверхности можно воспользоваться упрощенными асимптотическими формулами с учетом функциональной зависимости освещенности от угла падения солнечного излучения на атмосферу. Можно, однако, получить оценки характера изменения дневной освещенности на поверхности Венеры с высотой Солнца по аналогии с расчетами для земной атмосферы в более или менее сопоставимых условиях. В первом приближении атмосфера Венеры с протяженным облачным слоем и толстым релеевским подслоем подобна земной атмосфере с облаками. Величина альbedo поверхности Венеры, по оценкам, невелика, что позволяет сравнить ее с земной поверхностью без снегового покрова.

На рис. 1 представлено семейство кривых, показывающих изменение дневной освещенности поверхности Земли без снегового покрова в зависимости от зенитного угла ζ . Значение освещенностей для Земли (на шкале $E_{\odot}$ справа) дано для зенитных углов от 85 до 35° , так как обычно считается, что при более высоком положении Солнца освещенность для диффузного излучения изменяется незначительно. Облачный слой Венеры и плотная газовая атмосфера по своим свойствам могут приближаться к сплошным кучевым или слоисто-кучевым облакам (Sc, St). В качестве наиболее близких аппроксимаций были выбраны кривые 4—9, которые не сильно отличаются от косинусоиды. Экстраполяция кривых 4 и 8 (короткие штрихи) давала, таким образом, крайние значения освещенности на поверхности Венеры при нормировке их на измеренную величину E в месте посадки «Венеры-8».

Слева на оси ординат показана шкала освещенностей $E_{\odot}$ у поверхности Венеры, соответствующая нормировке для номинального угла над горизонтом $\theta = 5,5 \pm 2^\circ, 5$. В этом случае при положении Солнца в зените, $\theta = 90^\circ$, имеем освещенность в пределах от 1800 до 4200 лк. Пересчет по упрощенным асимптотическим формулам дает при $\theta = 5^\circ, 5$ $E \approx 6600$ лк. Если же принять во внимание допуск на угол θ , то в случае $\theta = 8^\circ$ освещенность при пересчете к зениту составит 3300 лк, а в случае наиболее вероятного значения $\theta = 3^\circ$ около 9300 лк.

Приближенный характер оценок $E_{\odot}(\theta)$ обуславливался как не вполне адекватными условиями в атмосферах Земли и Венеры, так и предположением об одинаковом спектральном составе светового потока, практически соответствующем солнечному. На самом деле при прохождении света через релеевский слой значительной оптической толщины происходит перераспределение энергии в солнечном спектре. Значительно меньше влияют облака, рассеяние в которых преимущественно неселективно. В хорошо известном простейшем случае прямого луча и при не слишком больших τ максимум излучения смещается в длинноволновую область. В более реальном случае венерианской атмосферы, где происходит многократное рассеяние, условия ближе к световому режиму в полубесконечной среде. Если $\omega_0 = 1$, то у поверхности возможен, наоборот, сдвиг спектрального состава солнечного излучения в синюю область за счет ее освещенности атмосферой, в которой преобладают синие кванты. Вместе с тем, поскольку в плотной, многократно рассеивающей атмосфере Венеры $\omega_0 < 1$, наиболее вероятно было ожи-

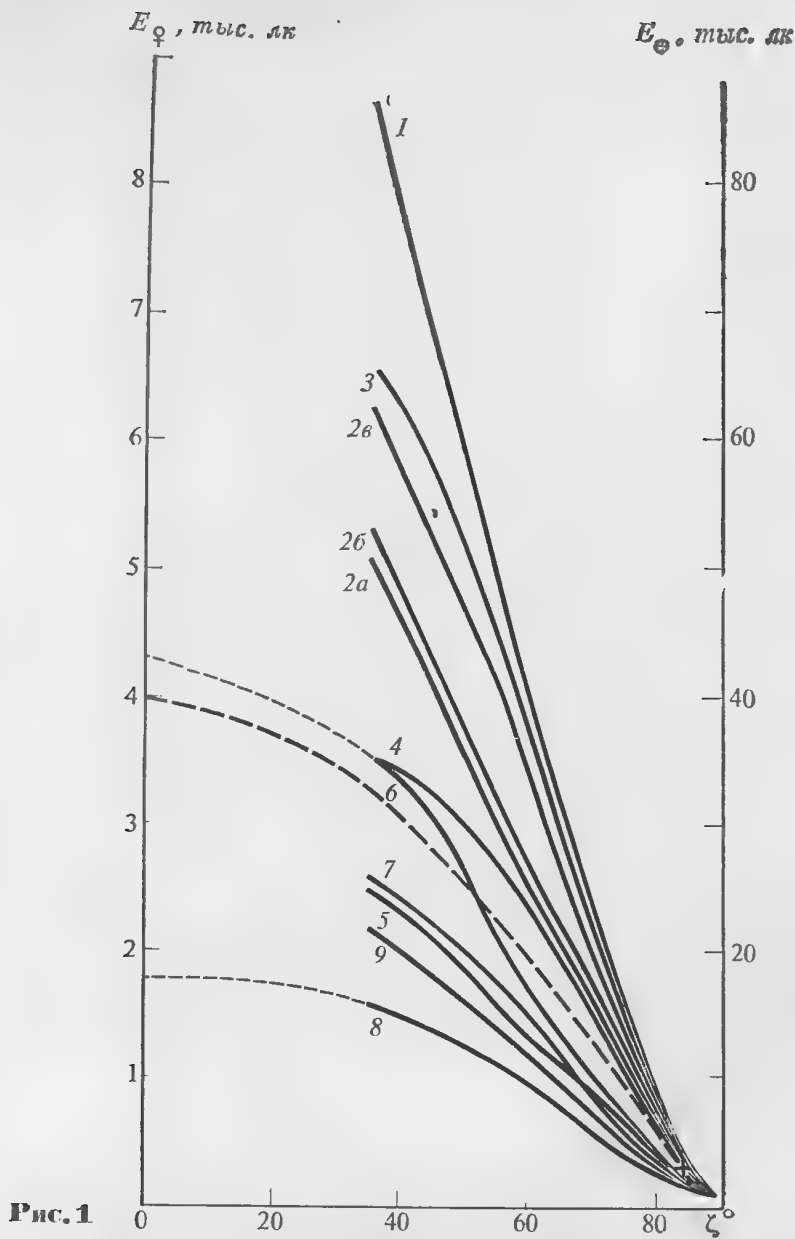


Рис. 1

Изменение дневной освещенности поверхности Земли без снегового покрова в зависимости от зенитного угла Солнца при различных типах облачности (шкала $E_{\oplus}$) и ее экстраполяция к условиям освещенности на Венере (шкала $E_{\odot}$)

1 — безоблачно; 2a — перистые облака Ci, Cs, Солнце в облаках, закрыто $\frac{1}{4}$ неба; 2b — то же, закрыто $\frac{1}{2}$ неба; 2c — то же, закрыто все небо; 3 — перисто-кучевые облака Sc; 4 — высококучевые облака Ac; 5 — кучевые облака Cu; 6 — слоисто-кучевые облака Sc; 7 — кучево-дождевые облака Cb; 8 — слоистые облака St; 9 — дождевые облака Ns. Короткие штрихи — экстраполяция кривых 4 и 8, длинные штрихи — косинусоида, дающая экстраполяцию условий освещенности на Венере к полудню. Крестик соответствует условиям нормировки для шкалы $E_{\odot}$

дать, что коротковолновая область спектра испытывает более сильное поглощение. Это должно приводить к заметному изменению показателя цвета (смещению в красную область).

Эти основные исходные предпосылки и оценки были положены в основу модели светового режима у поверхности Венеры. Согласно этой модели, уровень освещенности даже с учетом минимально возможного значения оказывался достаточным для получения изображения в широком интервале углов Солнца над горизонтом, во всяком случае более $10\text{--}20^\circ$. Однако априори трудно было ожидать приемлемых условий по контрастам, создаваемым в основном неровностями ландшафта в месте посадки. Оценки микрорельефа поверхности по данным радиолокационных отражений в дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн не позволяли ожидать заметных неоднородностей рельефа. Присутствие диффузной компоненты отраженного излучения свидетельствует о наличии на поверхности планеты областей, являющихся шероховатыми для сантиметровых и дециметровых волн, т. е. имеющих неровности микрорельефа меньше длины волны. Статистический анализ относительной вероятности наклонов для длины волны около 20 см приводил к представлениям о том, что средняя величина наклонов составляет $8^\circ,2$, в то время как для Луны $\theta = 10^\circ,2$ ($\lambda = 60$ см). Таким образом, неровности рельефа Венеры в среднем меньше, чем у Луны. Другими словами, в районе посадки уровень контрастов мог оказаться недостаточным для получения качественного изображения. Это привело к идее ввести специальную дополнительную подсветку, с тем чтобы искусственно подчеркнуть контрасты за счет угла $\sim 30^\circ$ между направленным светом и осью телевизионного устройства.

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ИСПОЛЬЗОВАВШИЕСЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СЪЕМКИ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

*

IV

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Яркость объекта съемки B и контрасты K на нем относятся к основным исходным данным при проектировании съемочной системы. Если известны отражательные характеристики поверхностей объекта, т. е. коэффициент яркости ρ , то вместо яркости можно использовать освещенность E . Перечисленные исходные данные определяют необходимые энергетическую и контрастную чувствительности системы. При подготовке таких сложных экспериментов, как первая съемка поверхности Венеры в очень неопределенных внешних условиях, нужен был особенно тщательный анализ этих характеристик, тем более что предполагаемое рассеянное освещение при отсутствии прямых солнечных лучей приводило к возможности малой величины контрастов на ее поверхности. Поэтому исследованию контрастов на поверхности планеты было уделено большое внимание.

Согласно [1], окончательное распределение яркости и освещенности по объекту можно рассматривать как результат лучистого обмена энергией в замкнутой системе поверхностей, внутри которой излучение не ослабляется, т. е. когда оптическая толщина слоя среды между объектом съемки и съемочной камерой мала. В большинстве случаев съемки, как правило, система не замкнута, так как есть открытые участки неба.

При этом систему поверхностей можно считать условно замкнутой, заменяя свечение атмосферы и возможных точечных источников излучения (например, в некотором приближении Солнца) свечением условной поверхности с распределением яркости, аналогичным распределению по соответствующим участкам неба. Яркость в произвольной точке i объекта складывается из яркости собственного B_c и отраженного излучений:

$$B(\mathbf{r}_i, s) = B_c(\mathbf{r}_i, s) + \frac{\rho(\mathbf{r}_i, s', s)}{\pi} E(\mathbf{r}_i), \quad (1)$$

где $\mathbf{r}_i$ — радиус-вектор, определяющий координаты i -й точки, s' , s — единичные векторы, определяющие направление падающего и отраженного лучей.

Коэффициент яркости зависит от индикатрисы отражения поверхности $\rho(\mathbf{r}_i, s', s)$ и ее альбедо $A(\mathbf{r}_i, s')$,

$$\rho(\mathbf{r}_i, s', s) = A(\mathbf{r}_i, s') \rho(\mathbf{r}_i, s', s). \quad (2)$$

Выражая освещенность $E(\mathbf{r}_i)$ в (1) через яркость в произвольной

точке j и используя (2), получаем интегральное уравнение для яркости

$$B(r_i, s) = B_c(r_i, s) + \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} A(r_i, s') p(r_i, s', s) B(r_j, s') \cos \zeta_i d\omega_j, \quad (3)$$

где ζ — угол между направлением падающего на площадку излучения и нормалью к площадке, ω — телесный угол.

Уравнение (3) показывает связь между наблюдаемым распределением яркости по объекту съемки и определяющими его факторами, такими, как оптические характеристики объекта (альbedo и индикатриса отражения), его геометрия, распределение источников излучения. Из этого уравнения следует постановка прямой и обратной съемочных задач.

Прямая задача заключается в определении поля яркости по заданным характеристикам объекта и условиям освещения. В результате решения уравнения автоматически учитывается взаимная подсветка между деталями объекта. Решение прямой задачи необходимо на этапе подготовки съемки для определения требуемых параметров съемочной системы. Обратная задача — это задача интерпретации полученного распределения яркости по поверхности объекта съемки, в результате которой находятся физические характеристики объекта.

Распределение яркости по объекту определяет контрасты на нем. Наиболее употребительное выражение для контраста [2]

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}}. \quad (4)$$

Из выражений (1) и (4) понятно, что основными причинами возникновения контрастов у несамосветящихся объектов являются:

1) наличие площадок с различными коэффициентами яркости, $\rho \neq \text{const}$ при $E = \text{const}$.

2) наличие неровностей поверхности, в результате чего освещенности различных площадок неодинаковы, $\rho = \text{const}$ при $E \neq \text{const}$;

3) $\rho \neq \text{const}$ и $E \neq \text{const}$.

Для первого и второго случаев вместо (4) имеем соответственно

$$K = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\rho_{\max}}, \quad (5)$$

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}}. \quad (6)$$

Решение прямой задачи было дано в общем виде и для различных конкретных случаев съемки поверхности Венеры [1, 3, 4]. При этом принималась определенная модель атмосферы и поверхности Венеры.

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПО АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ И СВЕТОВОМУ РЕЖИМУ В НЕЙ

Оптическая модель атмосферы нужна для определения абсолютной величины освещенности на поверхности планеты и выяснения характера освещения поверхности, т. е. 1) функции распределения яркости по не-

босводу $B(\vartheta, \varphi)$ в зависимости от зенитного расстояния ϑ и азимута φ излучающей точки и 2) спектрального состава падающего излучения. До полета АМС «Венера-8» рассматривалась двухслойная модель атмосферы Венеры, состоящая из облачного слоя и расположенного под ним газового слоя [5, 6]. Причем, если о функции $B(\vartheta, \varphi)$ можно было строить достаточно обоснованные предположения, то оценки абсолютной величины освещенности были очень неопределенны. Что касается спектрального состава излучения, то анализ проводился только для длин волн $\lambda \geq 0,6$ мкм.

В 1972 г. на АМС «Венера-8» были получены первые данные по освещенности в атмосфере Венеры [7] (см. также гл. III), согласно которым определенная доля солнечного излучения достигает поверхности планеты. Отмечая большую ценность этой информации, нужно сказать, что объем ее и точность были недостаточны для определенных выводов по структуре облачного слоя. В связи с этим были предложены модели и однородного и неоднородного облачного слоя [7—13].

Однако естественно принять простейшую модель, если она дает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными. На основе прямых фотометрических измерений в атмосфере Венеры [7] с привлечением результатов обработки наземных фотометрических, спектроскопических и поляризационных измерений [5, 6, 14—24] было показано [11], что возможно использование простейшей двухслойной модели типа [5, 6]. Результаты работы [11] согласуются с результатами [7—10]. В отличие от них в [11] предпринята попытка грубого определения спектрального состава излучения у поверхности и дан наиболее корректный переход от области измерения АМС «Венера-8» к другим значениям зенитного расстояния Солнца в рамках указанной модели. Вследствие этого полученные в [11] результаты были использованы при подготовке телевизионных экспериментов на АМС «Венера-9» и «Венера-10». Исследовавшийся спектральный диапазон 0,4—0,8 мкм соответствовал диапазону измерения освещенности на АМС «Венера-8» и области спектральной чувствительности съемочных систем на АМС «Венера-9» и «Венера-10».

Характеристики облачного слоя следующие [11]: высота верхней границы 66—71 км; геометрическая толщина 37,5—42 км; оптическая толщина 60—73; средний объемный коэффициент рассеяния $(1,6 \div 1,72) \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$; альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц в области 0,4—0,6 мкм $\sim 0,9972$, в области 0,6—0,8 мкм $\sim 0,9998$. Используя эти характеристики и характеристики подоблачного слоя [5, 6], а также принимая, согласно [18, 23], первый коэффициент в разложении индикатрисы рассеяния частиц облачного слоя по полиномам Лежандра равным 2, получили данные по энергетической освещенности в атмосфере Венеры как функции высоты при разных значениях зенитного расстояния Солнца $z_{\odot}$. Из них была получена представленная на рис. 1 зависимость $E(z_{\odot})$ при альbedo поверхности 0,2.

Интерпретация результатов измерения освещенности в [11] была проведена с разбиением спектрального диапазона 0,4—0,8 мкм на поддиапазоны: коротковолновый 0,4—0,6 мкм и длинноволновый 0,6—0,8 мкм. Хорошее совпадение с экспериментальными данными было получено при соотношениях коротковолнового и длинноволнового потоков излучения $0 \div 10$ — $100 \div 90\%$ у поверхности. Кроме того, совпа-

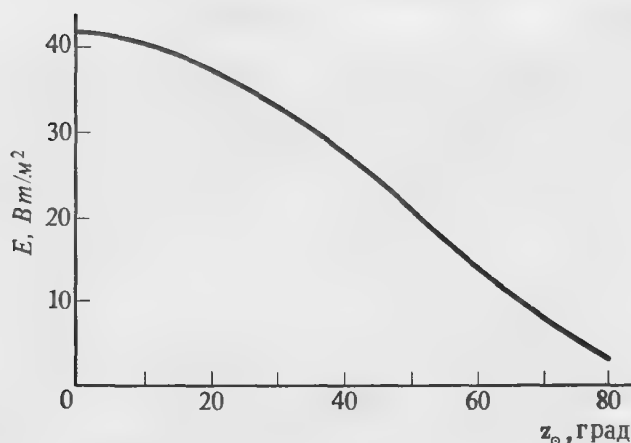


Рис. 1

Зависимость освещенности поверхности Венеры от зенитного расстояния Солнца

дение расчетных и экспериментальной зависимостей в пределах ошибок измерений имело место при значениях альбедо поверхности в диапазоне $A = 0 \div 0,6$, а ближе всего они были, когда $A = 0,2 \div 0,4$.

При подготовке съемки поверхности Венеры спектральный состав излучения принимался средним между указанными вариантами: $0,4 \div 0,6$ мкм — 5%; $0,6 \div 0,8$ мкм — 95%, а диапазон значений альбедо поверхности 0,05—0,5. Рассмотренные данные принимались как ориентировочные, так как они в значительной степени основаны на результатах измерений освещенности с помощью АМС «Венера-8», которые относятся к локальному району планеты и не очень точны. Это справедливо и для величины освещенности, и для принятого спектрального состава излучения. При отклонении параметров облачного слоя от принятых может произойти существенное изменение величины освещенности и деформация спектральной характеристики (по всей вероятности, в сторону увеличения коротковолнового излучения). Поэтому диапазон значений освещенности поверхности был расширен и для возможных значений зенитного расстояния Солнца в районе посадки станции $20\text{--}40^\circ$ составлял $13\text{--}54$ Вт/м², или, в пересчете на световые величины с учетом принятого спектра излучения, 960—4000 лк.

При указанной оптической толщине облачного слоя в газовом подоблачном слое реализуется глубинный режим [25]. Следовательно [26, 6]: 1) прямое солнечное излучение до поверхности практически не доходит, и она освещена рассеянным излучением; 2) яркость неба, наблюдаемая с поверхности, описывается функцией

$$B = a(b + c \cos \vartheta), \quad (7)$$

где a — постоянная величина при фиксированных значениях зенитного расстояния Солнца, альбедо поверхности и усредненной по всей толщине атмосферы индикатрисе рассеяния, $b = 1 + A$, $c = \frac{3}{2}(1 - A)$. Таким образом, поверхность Венеры освещается диффузным изотропным излучением.

МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

До полета АМС «Венера-9» и «Венера-10» информации о вариациях коэффициента яркости поверхности Венеры и ее индикатрисе отражения не было, поэтому поверхность планеты принималась однородной с ортотропной индикатрисой отражения. При этом возможно возникновение только рельефных контрастов, определяемых выражением (6).

В зависимости от характера местности объект съемки может иметь более или менее сложную структуру, состоящую из множества деталей с разными размерами, формой и пространственной ориентацией. При изучении рельефа Земли и других небесных тел [27—29] производится разложение его на простые формы, аппроксимируемые различными геометрическими телами. Достаточно полный набор простых форм рельефа дан в работе [30]. В несколько измененном и дополненном виде он представлен на рис. 2. Анализ контрастов на поверхности Венеры производился на примере трех схем: ступенчатой — как наиболее распространенной составной части многих объектов; близкой к ней схемы треугольной борозды; чашеобразной, часто встречающейся в виде кратеров.

Помимо формы объекта съемки нужно задать и характерные для него уклоны β . На этапе подготовки телевизионных экспериментов на АМС «Венера-9» и «Венера-10» единственным источником информации об уклонах на поверхности Венеры были радиолокационные данные. Они давали осредненные по большим площадям величины и относились к крупным элементам рельефа. Но, за неимением другой информации, они переносились и на локальные участки местности с характерными размерами деталей до единиц сантиметров. Согласно [31], где были обобщены имевшиеся радиолокационные данные по Венере, средние уклоны на ее поверхности на базе 10—0,3 м равны $5-7^\circ$. Эти углы были взяты в качестве контрольных при подготовке телевизионных экспериментов на АМС «Венера-9» и «Венера-10» [3].

КОНТРАСТЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

Таким образом, были заданы все величины, входящие в (3), и, следовательно, можно было рассчитать поле яркости или однозначно связанной с ней освещенности различных объектов съемки на поверхности Венеры и определить характерные для них контрасты. Эти расчеты и оценки были проведены для ступенчатого объекта в работах [1, 3], а для схем треугольной борозды и чашеобразной — в работе [4]. В них исследовалось также влияние многократного отражения излучения между поверхностями объекта съемки на его оптические характеристики. Все три схемы были проанализированы при естественном освещении, а для ступенчатой, кроме того, получены характеристики при искусственном и комбинированном (естественное + искусственное) освещении. Приведем окончательные результаты этих работ по контрастам на поверхности Венеры в виде графиков вначале при естественном освещении (рис. 3—5), а затем с использованием искусственного источника света (рис. 6—8). На этих графиках отражено влияние на контраст взаимной подсветки между поверхностями объекта съемки.

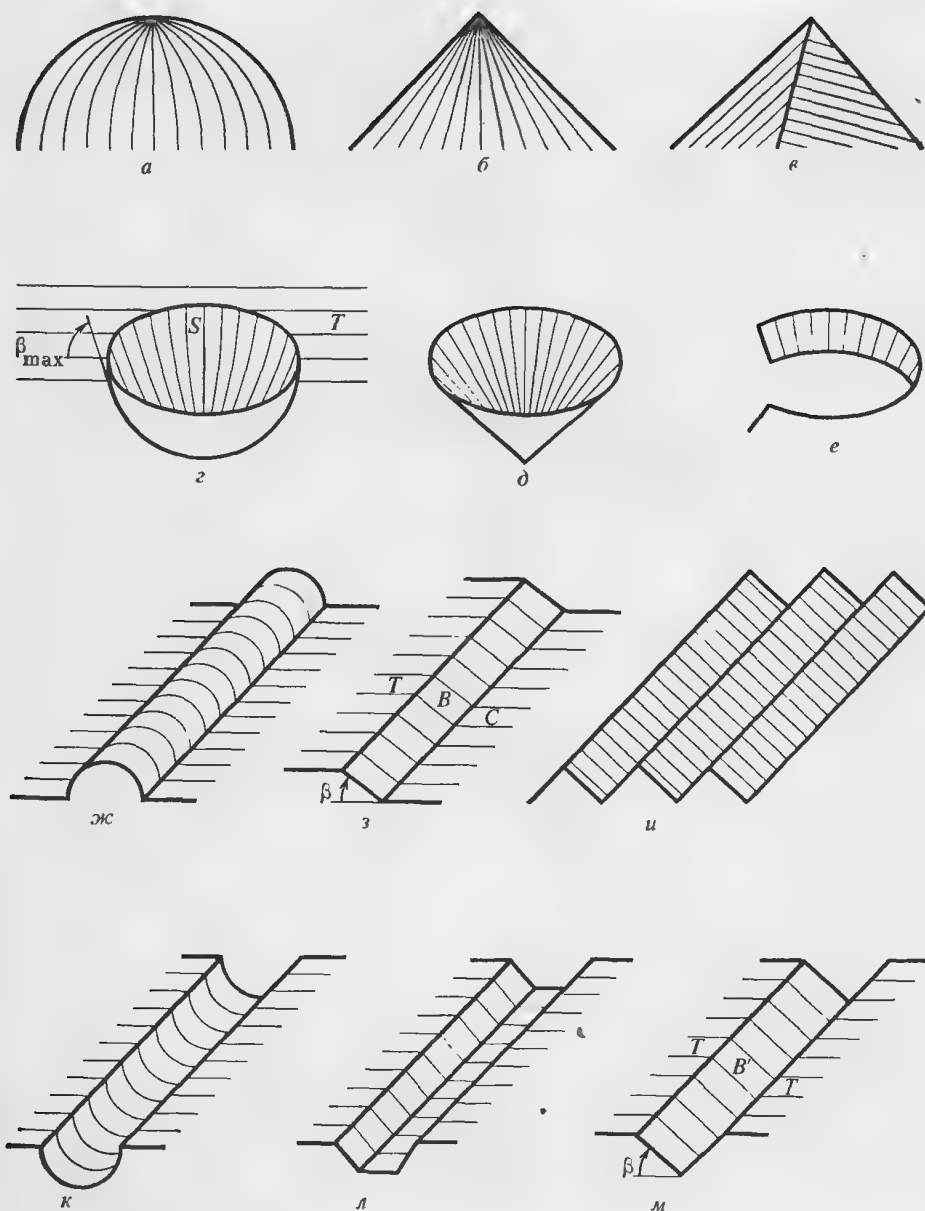


Рис. 2

Простые формы рельефа

a — куполовидная, *б* — конусовидная, *в* — пирамидальная, *г* — чашеобразная, *д* — воронкообразная, *е* — циркообразная, *ж* — вал, *з* — ступенчатая, *и* — гряда, *к* — цилиндрическая борозда, *л* — трапецидальная борозда, *м* — треугольная борозда

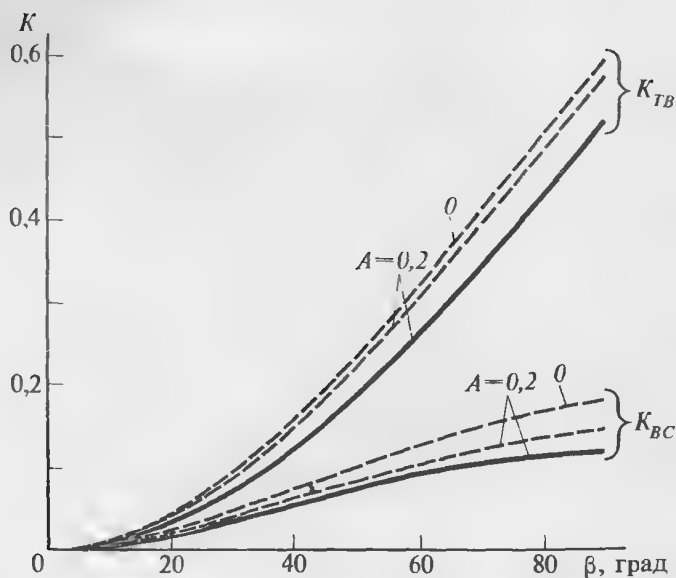


Рис. 3

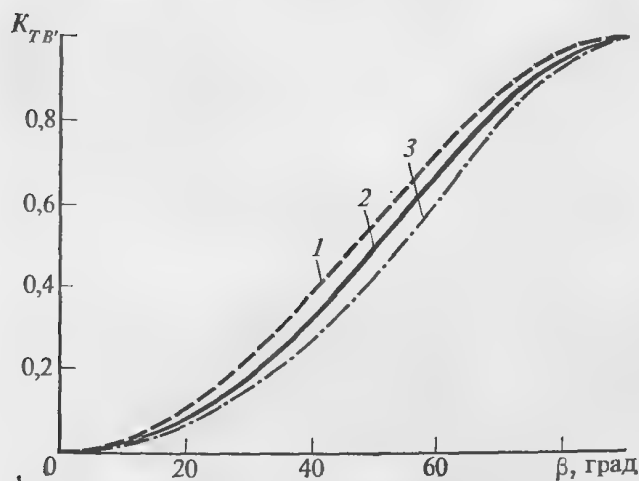


Рис. 4

Контрасты ступенчатого объекта при естественном освещении

Штриховая кривая — без учета взаимной подсветки, сплошная — с учетом

Контрасты треугольной борозды при естественном освещении

1 — $A = 0$; 2 — $A = 0,2$; 3 — $A = 0,4$

На рис. 3 показаны графики контрастов между горизонтальными поверхностями T, C и поверхностью склона B в зависимости от угла наклона β в ступенчатой схеме (см. рис. 2, з).

Контрасты между наклонной поверхностью B' и горизонтальной T в схеме треугольной борозды (рис. 2, м) больше, чем у ступенчатого объекта. На рис. 4 они представлены в зависимости от уклона поверхности B' при разных значениях альбедо. Чашеобразная форма рельефа аппроксимировалась сферическим сегментом. Контрасты между горизонтальной поверхностью T и точками сферической поверхности S , задаваемыми относительной высотой $\bar{h} = h/h_{\max}$ (отсчет от нижней точки), изображены на рис. 5. Зависимости представлены для разных соотношений между высотой сегмента и радиусом образующей его сферы, определяющих максимальный угол $\beta_{\max}$ у края сферического сегмента, и двух значений альбедо поверхности 0,2 и 0,4.

При получении этих контрастов требовалось только выполнение закона распределения яркости по небосводу (7). Следовательно, найденные зависимости справедливы для любой поверхности, находящейся на большой оптической глубине в консервативно рассеивающей среде, и могут найти более широкое применение, чем только при съемке поверхности Венеры.

Сравнение контрастов в рассмотренных схемах показывает, что они, как и следовало ожидать, возрастают у отрицательных форм рельефа и могут достигать значительной величины вплоть до ~ 1 . Контрасты тем больше, чем меньше телесный угол, в котором излучение при-

ходит от небосвода в углубление, как, например, в схеме борозды. Поэтому максимальных контрастов можно ожидать между открытой горизонтальной площадкой и воронкообразным углублением.

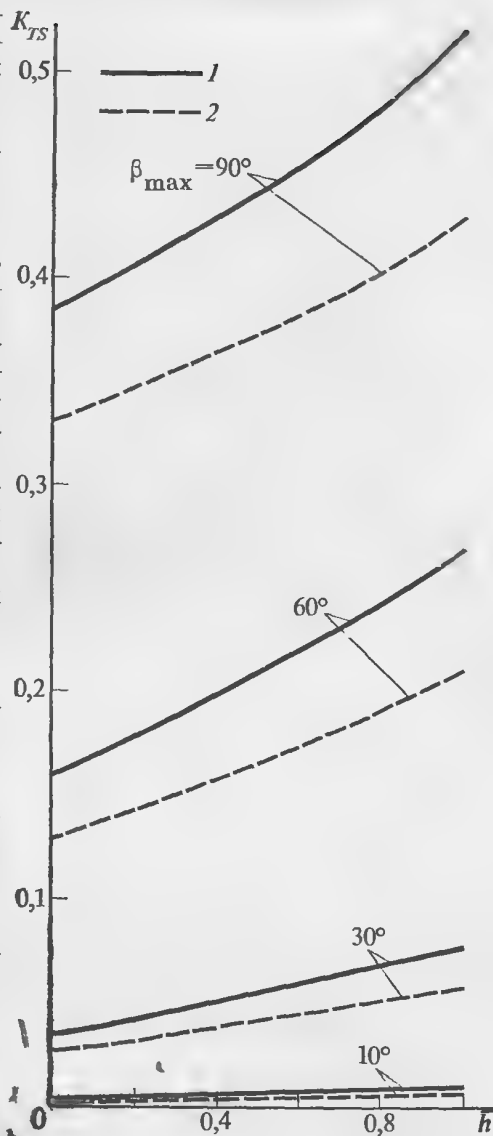


Рис. 5

Контрасты чашеобразного объекта при естественном освещении

1 — $A = 0,2$; 2 — $A = 0,4$

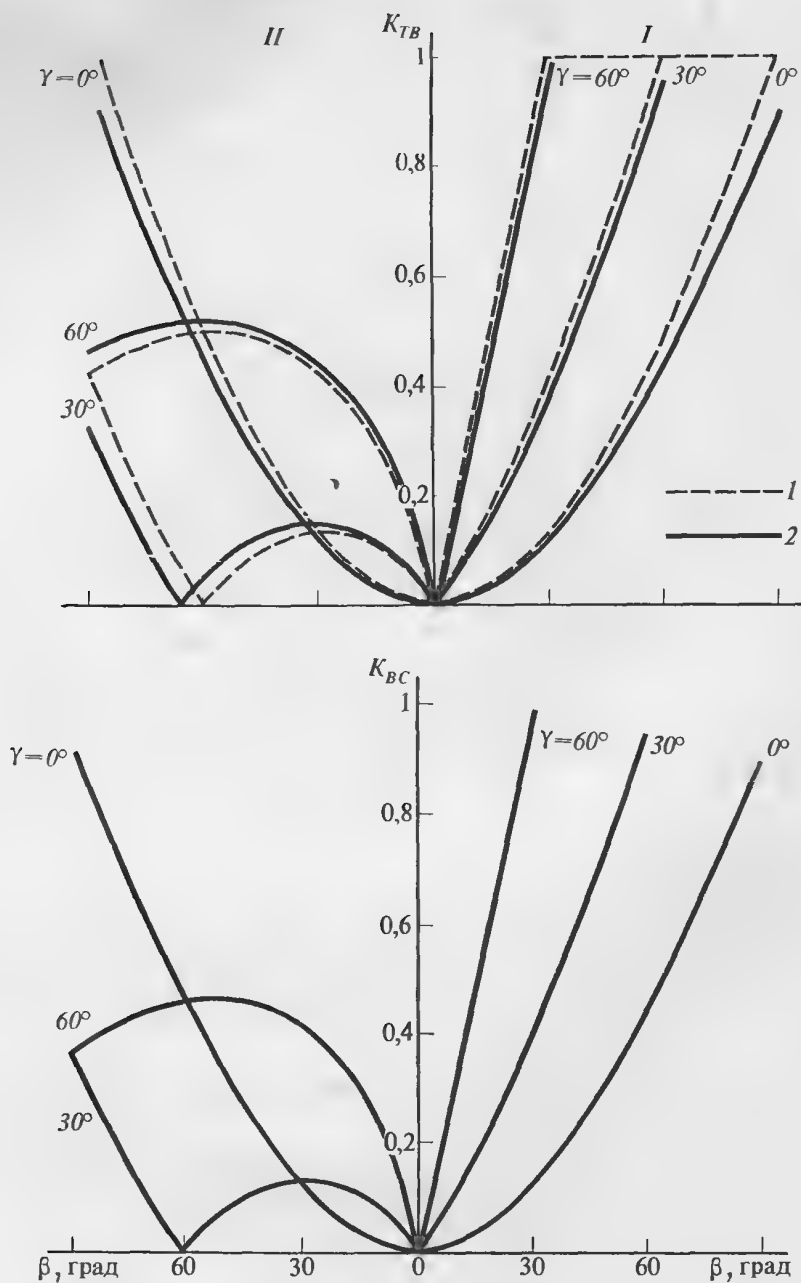


Рис. 6

Контрасты ступенчатого объекта при искусственном освещении

1 — $A = 0$; 2 — $A = 0,2$

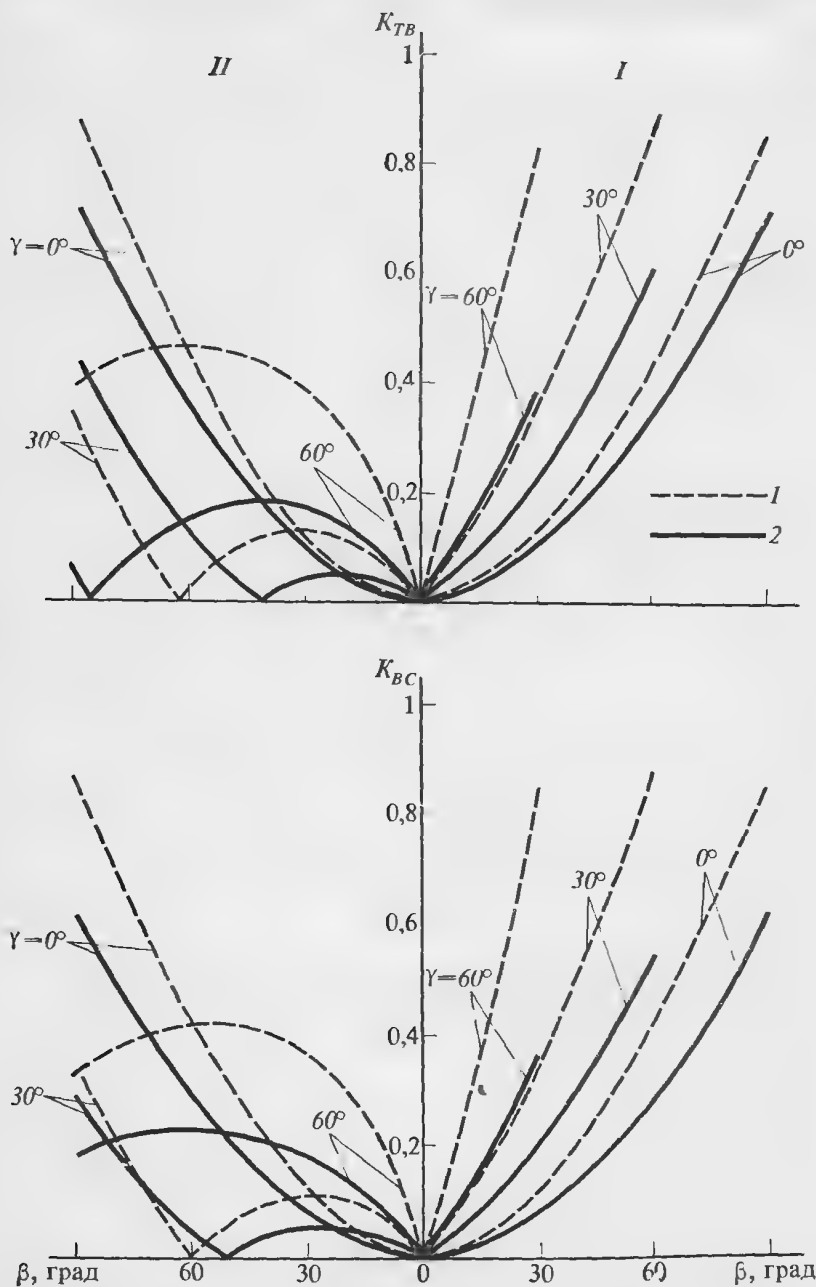


Рис. 7

Контрасты ступенчатого объекта при комбинированном освещении

1 — $Q = 0,1$; 2 — $Q = 1$

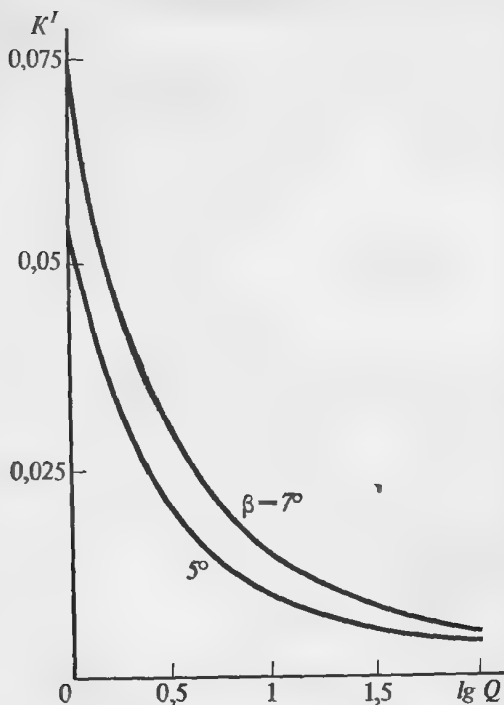


Рис.8

Зависимость контрастов от соотношения между освещенностями естественным и искусственным излучением

ным E_e и искусственным $E_{и}$ излучением: $Q = E_e/E_{и} = 1$ и $Q = 0,1$. Когда $Q = 0,1$, они приближаются к контрастам при искусственном освещении.

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ С ПОЛУЧЕННЫМИ КОНТРАСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Полученные величины контрастов позволяют сделать вывод о необходимости контрастной чувствительности съемочных систем и о применимости существующих систем при каждом виде освещения. Поскольку на поверхности могут присутствовать те или иные формы рельефа, то анализ проведем на примере ступенчатой схемы — распространенного элемента многих естественных образований. Если максимальная контрастная чувствительность системы $\delta_m \approx 0,1$, то при естественном освещении будут зафиксированы уклоны $\beta > 30^\circ$, если $\delta_m \approx 0,01$, то $\beta > 8^\circ$. В случае комбинированного освещения (с мощной подсветкой) указанным δ_m соответствуют минимальные фиксируемые уклоны $\beta \approx 3^\circ$ и $\beta \approx 1^\circ$ при $\gamma = 60^\circ$. Минимальные фиксируемые уклоны при искусственном освещении будут несколько меньше. Нужно отметить, что передача ка-

В то же время для указанных выше средних уклонов $5-7^\circ$ контрасты будут малы. Например, для ступенчатого объекта съемки они составляют величины $0,0014-0,0025$. Повышение контрастов возможно при использовании направленного излучения искусственного источника света. В связи с этим была проведена оценка контрастов при введении искусственной подсветки для ступенчатого объекта съемки. На рис. 6 для двух положений источника света I (над поверхностью T) и II (над поверхностью C) построены графики контрастов при искусственном освещении в зависимости от угла наклона площадки β для различных высот расположения источника света, определяемых углом γ между вертикалью и направлением на источник. Контрасты для этой же схемы при комбинированном освещении представлены на рис. 7 при $A = 0,2$; $\gamma = 0, 30, 60^\circ$ и двух соотношениях освещенностей горизонтальной поверхности естествен-

чественного изображения при этих уклонах в отличие от их обнаружения (фиксирования) требует в несколько раз лучшей контрастной чувствительности. Таким образом, необходимая контрастная чувствительность определяется средними уклонами рельефа. Как указывалось выше, для средних уклонов $5-7^\circ$ на поверхности Венеры при естественном освещении получаются следующие величины контрастов: 0,0014—0,0025. У современных космических съемочных камер, в особенности предназначенных для исследования таких малоконтрастных объектов, как Марс, контрастная чувствительность по деталям, состоящим из нескольких элементов разложения (разрешения), составляет десятые доли процента [32]. Камера с такими параметрами в лучшем случае только зафиксирует указанные уклоны. Этот факт требует, с одной стороны, критического рассмотрения величины средних уклонов, а с другой — анализа аппаратурных возможностей для передачи изображения такого рельефа.

По всей вероятности, перенос данных радиолокационных измерений на микрорельеф не вполне корректен. Возвращаясь к работе [31], напомним, что для образований аналогичных размеров на поверхности Луны приводятся средние уклоны около $8-11^\circ$, в то время как телевизионная съемка ее поверхности [33, 34] свидетельствует о наличии сложного микрорельефа со значительно большими уклонами (до 90° и более). Проводя аналогию с Луной, можно было предположить, что и на Венере есть рельеф с уклонами, большими, чем указанные средние, и, следовательно, имеющий достаточно высокие контрасты.

Что касается аппаратурных возможностей получения изображения такого сглаженного рельефа, то необходимо было или увеличивать контрастную чувствительность съемочных камер, или повысить контраст с помощью искусственной подсветки. Вторым вариантом был более простым. При $\beta = 5-7^\circ$ и $\gamma = 60^\circ$ имеем следующие значения контрастов: искусственное освещение 0,13—0,16; комбинированное 0,05—0,075 ($Q = 1$) и 0,11—0,14 ($Q = 0,1$). Это показывает эффективность введения искусственной подсветки.

Рассмотренные два фактора приводят к выводу о возможности съемки поверхности при естественном освещении с дополнительной искусственной подсветкой локальных зон съемочной системой, имеющей контрастную чувствительность порядка единиц процентов. В каждом конкретном случае комбинированного освещения должен осуществляться выбор величины Q . Например, достижение максимального превышения искусственной освещенности над естественной, выгодное для повышения контрастов, может оказаться нецелесообразным. Во-первых, уровень естественной освещенности на поверхности Венеры может быть достаточно высоким [41]. Тогда создание освещенности от искусственного источника света, превышающей естественную, сопряжено с большими энергетическими затратами. Во-вторых, если в поле зрения есть участки поверхности с естественным и комбинированным освещением, это приводит к необходимости обеспечить высокую контрастную чувствительность съемочной системы ($\sim 0,001$) при широком динамическом диапазоне ($\sim 10^3$). Поэтому особенно важен случай $Q \geq 1$, т. е. когда освещенность от искусственного источника света меньше или равна естественной.

Рассмотрим для примера расположение источника света I при $\gamma = 60^\circ$, уклоны на поверхности 5 и 7° . Получаемые значения $K_{ТВ}^I$ и $K_{Вс}^I$ при различных Q близки, поэтому на рис. 8 изображены усредненные графики $K^I(Q)$.

Сравнивая эти результаты с контрастами при естественном освещении, можно сказать, что даже очень слабая искусственная подсветка приводит к увеличению контраста на поверхности. Например, подсветка, дающая освещенность в 100 раз меньшую, чем естественная, увеличивает контраст примерно в 2 раза. Но величина контраста при этом остается малой.

Имея данные по контрастной чувствительности съемочной системы, можно определить необходимое Q и, следовательно, требования к мощности искусственной подсветки. Так, если съемочная камера имеет порог контрастной чувствительности 0,01, то для регистрации уклона на местности 5° , согласно рис. 8, необходимо обеспечить условие $Q \leq 10$. Отсюда при известной естественной освещенности однозначно определяется величина требуемой освещенности от осветителя. Подобный пример приведен в [3].

Первые панорамы поверхности Венеры свидетельствуют о наличии значительно больших уклонов, чем $5-7^\circ$. Но в будущем не исключена возможность съемки районов Венеры с сильно сглаженным рельефом.

СВОДКА ОСНОВНЫХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ В 1975 г.

Обобщая все полученные данные как на основе модельных предположений, так и имевшихся экспериментальных данных, приведем перечень основных исходных характеристик для съемки поверхности Венеры с помощью АМС «Венера-9» и «Венера-10». Съемка производится при естественном освещении с дополнительной искусственной подсветкой в двух локальных зонах.

Угол панорамного обзора $180 \pm 4^\circ$.

Угловые размеры зон подсветки $30 \pm 3^\circ$.

Съемочная система обеспечивает передачу изображения деталей поверхности, имеющих минимальные характерные размеры порядка сантиметров, при этом угловая разрешающая способность $\sim 21'$.

Спектральный диапазон съемки $0,4-0,8$ мкм.

Спектральный состав естественного освещения: при $0,4-0,6$ мкм 5%, при $0,6-0,8$ мкм 95%.

Освещенность горизонтальной поверхности естественным излучением $13-54$ Вт/м², или $960-4000$ лк. Освещенность горизонтальной поверхности искусственным излучением определяется условием регистрации уклона 5° ; при этом $Q \leq 10$ и ее величина в диапазоне $0,4-0,8$ мкм $> 5,4$ Вт/м², или > 400 лк. Индикатриса отражения поверхности ортотропная.

Альбедо поверхности $0,05-0,5$.

Контрасты на поверхности $0,001-1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панфилов А. С. Расчет оптических характеристик объектов съемки. Пример съемки поверхности Венеры: Препринт ИКИ АН СССР, Д-121. М., 1972.
2. Гаерилев В. А. Видимость в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1966.
3. Панфилов А. С.— Космич. исслед., 1975, 13, № 4, 612.
4. Панфилов А. С., Горон А. И.— Космич. исслед., 1976, 14, № 5.
5. Бирюков Ю. Л., Панфилов А. С., Титарчук Л. Г. Световой режим в атмосфере Венеры и оценки оптических характеристик применительно к задаче съемки ее облаков и поверхности: Препринт ИКИ АН СССР, № 55. М., 1971.
6. Бирюков Ю. Л., Панфилов А. С., Титарчук Л. Г.— В кн.: Космическая иконошка. М.: Наука, 1973, с. 106.
7. Авдусевский В. С., Маров М. Я., Мошкин Б. Е., Экономов А. П.— Докл. АН СССР, 1973, 210, № 4, с. 799.
8. Титарчук Л. Г.— Космич. исслед., 1973, 11, № 4, 602.
9. Мороз В. И. Рабочая модель атмосферы Венеры: Препринт ИКИ АН СССР, № 162, М., 1973.
10. Лукашескич Н. Л., Маров М. Я., Фейгельсон Е. М.— Космич. исслед., 1974, 12, № 2, 272.
11. Бирюков Ю. Л., Панфилов А. С.— Космич. исслед., 1974, 12, № 6, 903.
12. Lasis A. A., Hansen J. E.— Science, 1974, 184, N 4140, 979.
13. Devaus C., Herman M.— Icarus, 1975, 24, 19.
14. Gehrels T., Semuelsen R. E.— Astrophys. J., 1961, 134, 1022.
15. Coffen D. L., Gehrels T.— Astron. J., 1969, 74, N 3, 433.
16. Kuiper G. P.— Comm. Lunar Planet. Lab., 1968—1969, N 6 (101), 229.
17. Irvine W. M.— J. Atm. Sci., 1968, N 4, 25.
18. Соболев В. В.— Астрон. ж., 1968, 45, № 1, 1969.
19. Coffen D. L.— Astron. J., 1969, 73, N 3, 446.
20. Hansen J. E., Arking A.— Science, 1971, 171, 669.
21. Исследования атмосфер Марса и Венеры. Л.: Гидрометеоиздат, 1970.
22. Мороз В. И.— УФН, 1971, 104, № 2, 255.
23. Бирюков Ю. Л., Титарчук Л. Г.— Космич. исслед., 1972, 10, № 4, 576.
24. Фейгельсон Е. М.— Космич. исслед., 1972, 10, № 3, 411.
25. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред. Минск: Наука и техника, 1969.
26. Соболев В. В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972.
27. Ефремов Ю. К.— Вопросы географии, 1949, № 11, 109.
28. Вулканизм и тектоника Луны.— Тр. ГИП АН СССР, 1974, вып. 262.
29. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О., Черная И. М.— Космич. исслед., 1975, 13, № 1, 67.
30. Спиридонов А. И.— В кн.: Индикационные географические исследования. М.: Наука, 1970, с. 92.
31. Крупенин Н. Н.— Космич. исслед., 1972, 10, № 2, 279.
32. Селиванов А. С., Нараева М. К., Синельникова И. Ф. и др.— Техника кино и телевидения, 1974, № 9, 55.
33. Первые панорамы лунной поверхности. М.: Наука, 1969. Т. 2.
34. Передвижная лаборатория на Луне «Луноход-1». М.: Наука. 1971.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ СТАНЦИИ

«ВЕНЕРА-9» и «ВЕНЕРА-10»



Автоматические межпланетные станции «Венера-9» и «Венера-10» предназначены для проведения комплексных исследований атмосферы и поверхности планеты Венера и представляют собой новое поколение космических автоматов. Станции по конструкции и оборудованию полностью аналогичны и выполнены в виде связки собственно станции и спускаемого аппарата (СА).

ОА обеспечил управляемый перелет по трассе Земля — Венера и доставку СА в заданную точку пространства вблизи Венеры, откуда СА начал самостоятельный полет к планете.

Радиотехнические средства измерения параметров движения позволили точно определить местоположение космической станции и произвести необходимые коррекции траектории полета.

Большой объем телеметрической и научной информации, полученный на трассе перелета и при орбитальном полете, передавался на Землю по высокoinформативному магистральному радиоканалу, работающему в сантиметровом диапазоне волн, через остроуправленную бортовую антенну с многочастотным облучателем.

За двое суток до подлета к Венере от станций были отделены СА, а сами станции стали искусственными спутниками Венеры (ИСВ). Устройство СА схематически изображено на рис. 1.

Приведем некоторые данные о космических станциях «Венера-9» и «Венера-10» и их полете.

	«Венера-9»	«Венера-10»
Масса космической станции после выхода на траекторию полета к Венере, кг	4936	5033
Масса спускаемого аппарата, кг	1560	1560
Даты старта к Венере	8 июня 1975 г.	14 июня 1975 г.
Время прилета на Венеру	22 октября 1975 г.	25 октября 1975 г.
Характеристики орбиты, км		
апоцентр	112 200	113 900
перигей	1 510	1 620
Наклонение орбиты к плоскости венерианского экватора	34°10'	29°30'
Период обращения	48 ч 18 мин	49 ч 23 мин
Скорость входа в атмосферу Венеры, км/с	10,7	10,7
Место посадки СА (в системе координат, утвержденной Международным астрономическим союзом):		
широта	31°42'	16°02'
долгота	290°50'	291°00'

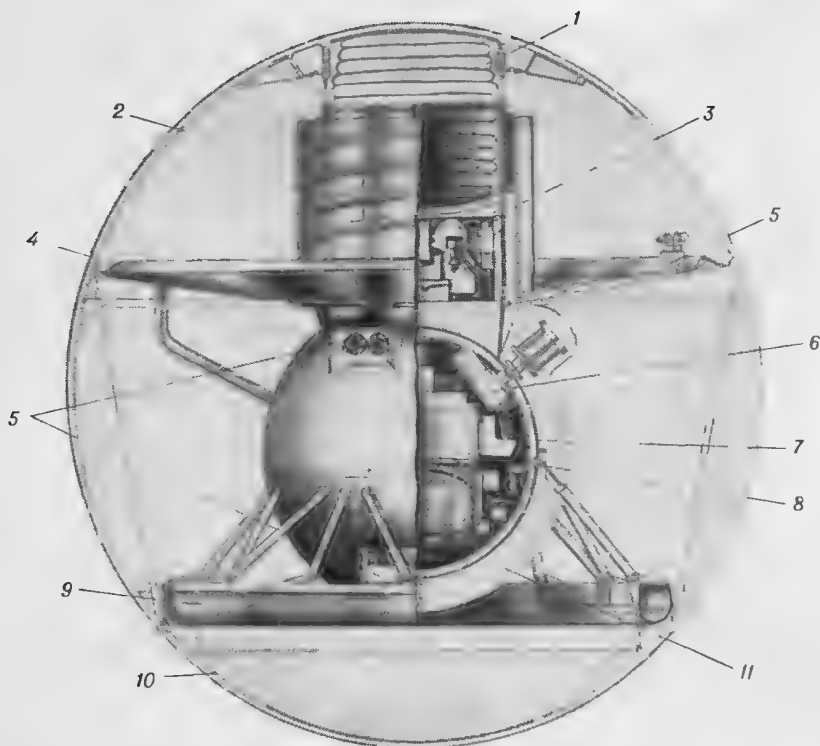


Рис. 1

Спускаемый аппарат станций «Венера-9» и «Венера-10»

1 — отсек парашютной системы; 2 — антенна; 3 — отсек научной аппаратуры, работающей в облачном слое; 4 — аэродинамическое тормозное устройство; 5 — научная аппаратура; 6 — телефотометр; 7 — прочный корпус; 8 — служебная аппаратура; 9 — посадочное устройство; 10 — теплозащитный корпус; 11 — теплоизоляция

На рис. 2 изображена схема спуска СА.

После аэродинамического торможения на высоте примерно 65 км при скорости около 250 м/с был осуществлен ввод парашютной системы СА. Был произведен отстрел крышки парашютного отсека с одновременным вводом вытяжного парашюта. Вытяжной парашют, который снизил скорость спускаемого аппарата до 150 м/с, в свою очередь ввел в действие парашют увода, после чего произошло разделение теплозащитного корпуса СА, верхняя часть которого и была отделена с помощью парашюта увода. Одновременно с отделением парашюта увода был осуществлен ввод тормозного парашюта. Во время спуска на тормозном парашюте по меткам программно-временного устройства были осуществлены включения бортовой аппаратуры радиокomплекса и научных приборов. Одновременно с включением радиокomплекса началась передача объектовой и научной информации со спускаемого аппарата на ИСВ и далее на Землю. Полет СА на тормозном парашюте продолжался

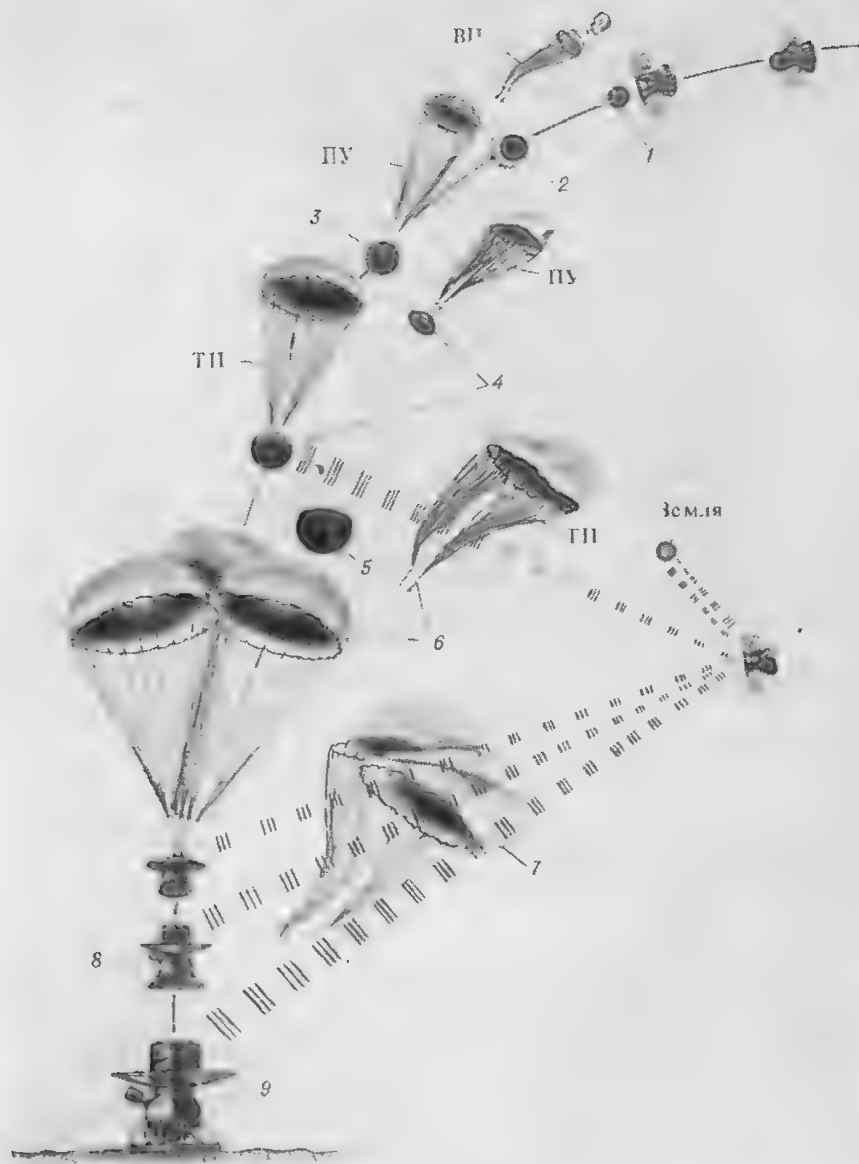


Рис. 2

Схема спуска посадочного аппарата станций «Венера-9» и «Венера-10»

1 — разделение орбитального и спускаемого аппаратов; 2 — вход в атмосферу, баллистический спуск; 3 — отстрел крышки, ввод вытяжного парашюта (ВП) и парашюта увода (ПУ); 4 — увод верхней теплозащитной оболочки, ввод тормозного парашюта (ТП), начало передачи информации; 5 — отстрел теплозащитной оболочки; 6 — отстрел тормозного парашюта, ввод основного парашюта; 7 — отстрел основного парашюта; 8 — спуск на аэродинамическом тормозном устройстве; 9 — посадка

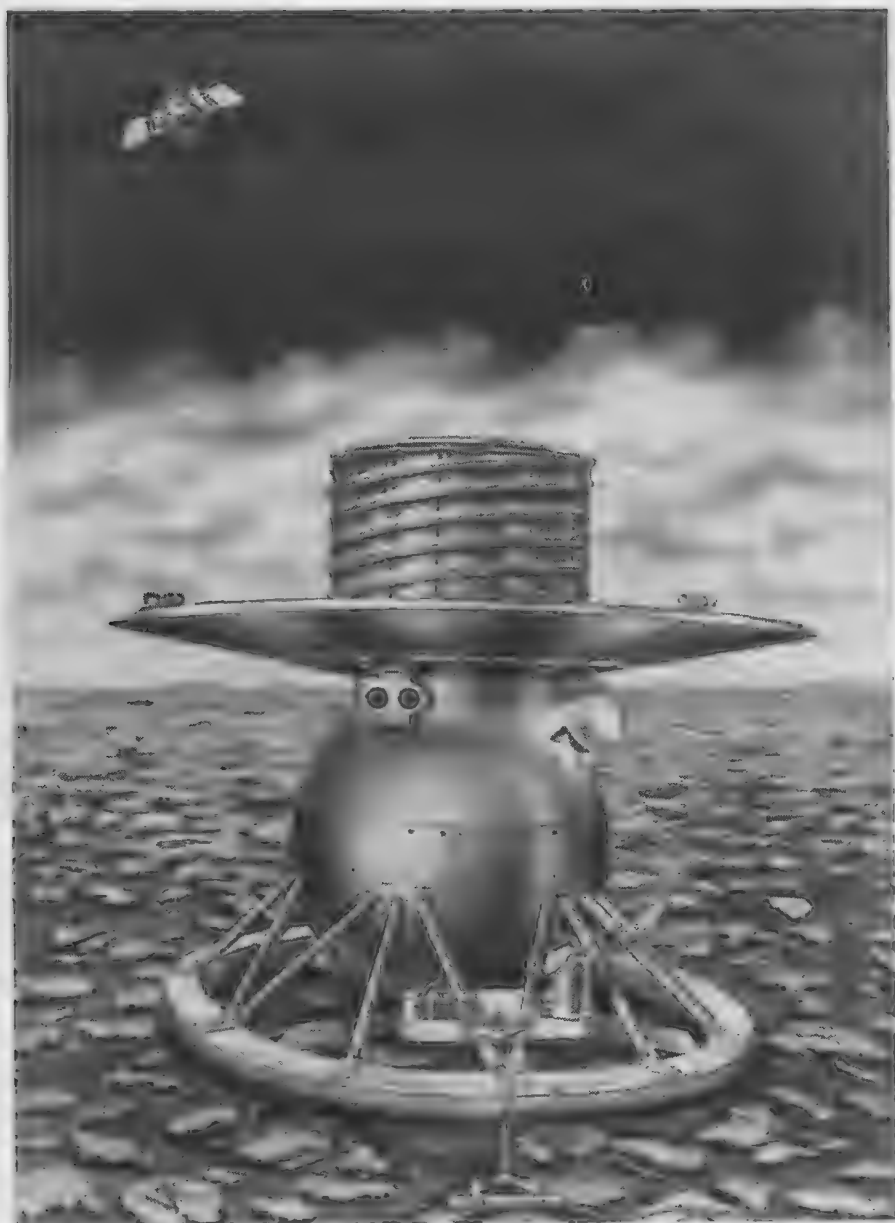


Рис. 3

Посадочный аппарат станций «Венера-9» и «Венера-10»

около 15 с. За это время скорость спуска снизилась до 50 м/с, и на высоте порядка 62 км был введен в действие основной трехкупольный парашют с общей площадью куполов 180 м². Через 4 с после ввода основного парашюта была отделена нижняя часть теплозащитного корпуса СА. Спускаемый аппарат в соответствии с программой прошел облачный слой за 20 мин, после чего основной парашют был отделен. Дальнейшее снижение СА производилось на жестких аэродинамических тормозных устройствах. При этом после отстрела основного парашюта скорость снижения СА сначала несколько увеличилась, а у поверхности за счет повышения плотности атмосферы уменьшилась примерно до 7 м/с.

Посадочные устройства, представляющие собой тонкостенные оболочки тороидальной формы, при посадке деформировались, поглотив тем самым энергию удара, и обеспечили ориентированное положение СА на поверхности Венеры. Посадочный аппарат показан на рис. 3.

Одной из главных задач запуска автоматических станций «Венера-9» и «Венера-10» было получение панорамных изображений поверхности планеты в месте посадки. Поэтому район посадки выбирался таким образом, чтобы обеспечить наиболее благоприятные условия для съемки. Для этого надо, чтобы освещенность поверхности в точке посадки была достаточно велика, т. е. чтобы Солнце было высоко над горизонтом.

Однако взаимное расположение Солнца, Венеры и Земли меняется так, что хорошо освещенные участки планеты не могут наблюдаться с Земли, непосредственная передача информации с СА по радиолинии СА — Земля из этих благоприятных для съемки районов невозможна. Использование спутника, выведенного на орбиту вокруг Венеры, для приема радиосигналов, передаваемых СА, опустившимся на дневную сторону, позволило не только заглянуть на ее хорошо освещенную сторону, но и резко повысить информативность радиолинии, т. е. увеличить объем информации, полученной с СА.

Дело в том, что радиосигналы с СА, несущие информацию, ослабевают прямо пропорционально квадрату расстояния. Орбитальный спутник в тысячи раз ближе к спускаемому аппарату, чем Земля, и поэтому мощность радиосигналов, попадающих на приемные антенны спутника, в миллионы раз больше мощности сигналов, достигающих наземного Центра дальней космической связи. И хотя огромные наземные антенны значительно эффективнее бортовых приемных антенн, выигрыш в информативности оказывается решающим.

Принятые на орбитальном аппарате сигналы после предварительной обработки ретранслировались по дециметровой радиолинии на Землю. При этом использовался штатный бортовой передатчик и остро-направленная антенна с многочастотным облучателем магистральной радиолинии орбитальный аппарат — Земля. Такая схема передачи позволила в сотни раз повысить объем получаемой с СА информации.

Радиоэлектронная аппаратура, установленная на СА, должна выдерживать воздействие огромных перегрузок, возникающих при его входе в атмосферу, и надежно работать при изменении температуры газа в СА в процессе сеанса связи почти на 70° С. Дело в том, что даже мощная теплозащита не в состоянии долго противостоять температуре

атмосферы Венеры. Для того чтобы продлить время работы аппаратуры СА, его пришлось предварительно охладить до отрицательных температур.

«Мозгом» космической станции является программно-временное устройство, обеспечивающее управление парашютной системой, определяющее режимы функционирования научной аппаратуры и радиокомплекса на всех этапах работы. Программно-временные устройства спроектированы так, чтобы выход из строя любого из тысячи элементов не приводил к сбою в программе работы. Выбор варианта программы работы осуществляется автоматически по сигналам с датчиков давления, с датчиков линейных и ударных перегрузок.

Видеосигналы, формируемые оптико-механическими телевизионными устройствами, поступали на телеметрическую систему, где преобразовывались в цифровую форму. Таким образом, вся информация, передаваемая по радиолинии СА — орбитальный аппарат (ОА), состояла из потока элементарных двоичных символов «1» и «0». Такой метод передачи сигналов позволил наиболее эффективно использовать мощность передающих устройств СА. Для повышения надежности передатчик снабжен схемой защиты, автоматически изменяющей его режим работы при изменении согласования с антенной (при изменении параметров антенны).

Приемные устройства, установленные на ОА, обеспечили автоматический поиск радиосигнала СА, частота которого сильно изменяется в процессе сеанса из-за доплеровского эффекта, вызванного быстрым перемещением спутника по орбите относительно СА, и «захват» и удержание этого сигнала с помощью системы АПЧ. Следует особо подчеркнуть, что все операции на СА и ОА в процессе сеанса ретрансляции выполнялись автоматически, хотя предусматривалась возможность изменения режимов работы и переключение комплектов аппаратуры ОА по командам с Земли в случае необходимости.

Для получения изображения поверхности Венеры в месте посадки СА панорамная камера устанавливалась в герметичном приборном отсеке СА, в котором в течение длительного времени обеспечивались нормальные условия по температуре и давлению. Кроме того, необходимо было создать «оптическое окно» к поверхности Венеры, где давление дости-

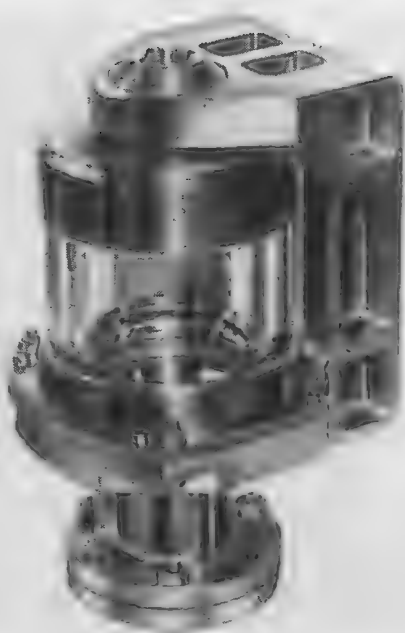


Рис. 4

Иллюминатор посадочного аппарата

гает около 100 атм, а температура 500° С, и не допускать их влияния на панорамную камеру. Эти обстоятельства потребовали проведения целого ряда технических и конструкторских мероприятий.

Существенное влияние на конструктивно-компоновочную схему оказал комплекс задач, связанных с обеспечением необходимого поля зрения камеры и разрешения на поверхности. Было признано наиболее целесообразным расположить камеру в верхней зоне приборного контейнера. Однако ввиду необходимости передачи изображения как ближнего, так и дальнего плана ось панорамирования камер была наклонена на 50° к вертикальной оси СА. При этом минимальное расстояние от поверхности до камеры составляло около 1 м. В поле зрения камеры попадала часть посадочного устройства СА с нанесенными на нее тестовыми контрастными изображениями. Такое расположение камеры позволяло получить изображение поверхности при малой прозрачности атмосферы и определить фотометрические характеристики поверхности планеты, а также в случае благоприятных метеоусловий получить панораму, охватывающую значительную площадь поверхности Венеры.

В месте установки камеры со стороны наружной части приборного отсека располагался оптический иллюминатор цилиндрической формы (рис. 4).

Для обеспечения заданного теплового режима и исключения влияния высокой температуры атмосферы Венеры на аппаратуру камера и иллюминатор были закреплены в приборном отсеке при помощи нетеплопроводных и теплопоглощающих конструктивных элементов. Иллюминатор был закрыт мощной теплоизоляцией, за исключением смотрового выреза, обеспечивающего необходимое поле зрения. Смотровой вырез в свою очередь был закрыт теплоизоляционной крышечкой, которая с помощью пироприборов сбрасывалась после посадки СА на поверхность Венеры. Этим обеспечивался, во-первых, тепловой режим камеры во время снижения СА в атмосфере Венеры и, во-вторых, защита стекла иллюминатора от возможного закопчения, осаждеия и конденсации на нем продуктов газовой выделения теплозащиты СА и каких-либо непрозрачных осадков из атмосферы Венеры.

Иллюминатор состоит из толстостенного цилиндрического кварцевого стекла, верхнего и нижнего фланцев.

Основные характеристики иллюминатора: фокусное расстояние 374 мм, светопропускание 95%.

Внутри цилиндрического иллюминатора расположено перископическое устройство камеры со сканирующим зеркалом. Тем самым основные тепловые потоки, проникающие через иллюминатор, воздействуют только на верхнюю часть камеры, не достигая электронной аппаратуры.

Все эти мероприятия обеспечили работу электронной аппаратуры по получению и передаче изображения поверхности Венеры в течение ~50 мин.

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА СТАНЦИЯХ «ВЕНЕРА-9» И «ВЕНЕРА-10»

Поверхность Венеры скрыта от земного наблюдателя облачным слоем, и поэтому сведения о ее структуре и оптических свойствах до полетов станций «Венера-9» и «Венера-10» были весьма ограничены. Условия на поверхности, непосредственно изученные предшествующими советскими автоматическими станциями типа «Венера», сильно отличаются от земных условий. Как уже указывалось, там царит высокая температура и высокое давление. Было найдено, что атмосфера Венеры почти полностью состоит из углекислого газа.

Ввиду наличия мощного облачного покрова венерианская поверхность освещена рассеянным светом. Величина освещенности, измеренная аппаратом «Венера-8» в 1972 г. [1, 2], составляла несколько сотен люкс. Были веские основания считать, что микрорельеф Венеры сильно сглажен и контрасты на ее поверхности очень малы [3, 4]. Не исключалась сильная замутненность приповерхностного слоя атмосферы.

Таким образом, при проектировании аппаратуры для станций «Венера-9» и «Венера-10» приходилось учитывать, с одной стороны, тяжелые условия работы на поверхности Венеры, а с другой — недостаточный уровень наших знаний характеристик поверхности и приповерхностного слоя атмосферы. Полученные результаты оказались во многом неожиданными как для разработчиков аппаратуры, так и для планетологов.

Передача видеосигнала была возможна только путем ретрансляции, так как во время посадки отсутствовала прямая видимость между СА и Землей. Для ретрансляции использовались впервые созданные искусственные спутники Венеры. По сравнению с прямой связью метод ретрансляции позволил также значительно повысить скорость передачи сигнала.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АППАРАТУРЫ

Сравнительный анализ различных средств передачи изображения показал, что наилучшим образом условиям работы на СА и требованиям к оптическим и электрическим характеристикам удовлетворяют оптико-механические панорамные камеры. Имеется большой положительный опыт их использования на лунных аппаратах, как неподвижных («Луна-9», «Луна-13»), так и подвижных («Луноход-1», «Луноход-2») [5, 6].

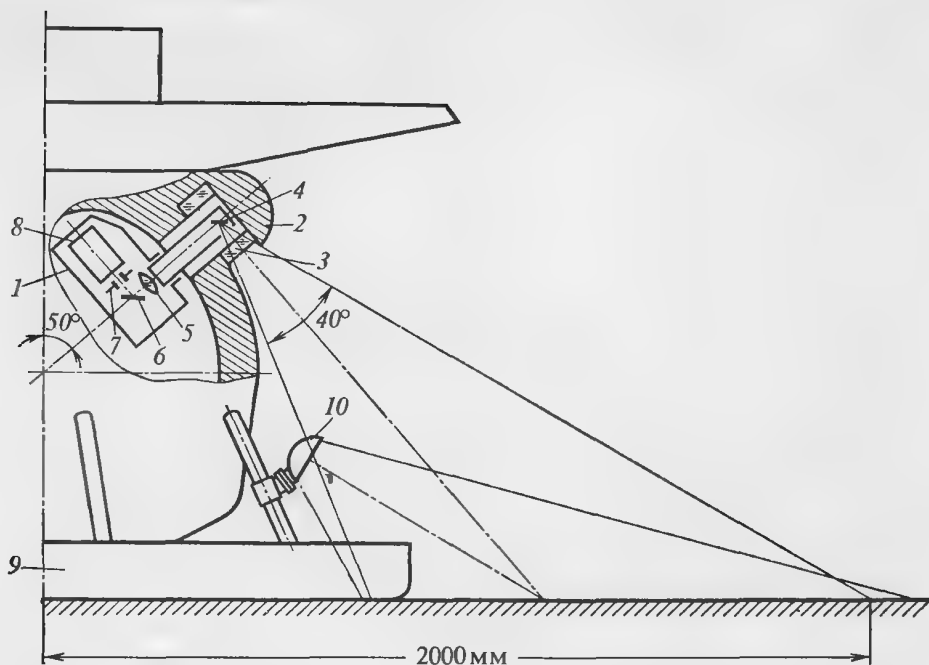


Рис. 1

Основные элементы камеры и их установка на спускаемом аппарате (вид сбоку)

В отличие от лучших аппаратов создание панорамных камер, работающих непосредственно во внешней среде, в данном случае не представлялось возможным. Поэтому была предусмотрена защита камер от особо жестких климатических воздействий на Венере конструктивными средствами.

В оптико-механической панорамной камере используется известный принцип сканирующего телефотометра. Основные элементы камеры и их установка на СА схематически показаны на рис. 1. Камера 1 расположена внутри герметичного и теплоизолированного корпуса 2. Съемка поверхности производится через цилиндрический иллюминатор 3, внутри которого установлено сканирующее зеркало 4 и элементы его привода. Другие элементы камеры — объектив 5, поворотное зеркало 6, диафрагма 7 и светоприемник 8, а также электромеханические и электронные блоки, не показанные на рис. 1, находятся внутри корпуса камеры. Обзор окружающей СА поверхности в номинальном угле $40 \times 180^\circ$ осуществляется за счет двух движений сканирующего зеркала — вращения вокруг оси панорамирования и качания в плоскости, проходящей через эту ось. Чтобы обеспечить передачу как близлежащих, так и удаленных участков поверхности (вплоть до горизонта на краях угла обзора), ось панорамирования наклонена на 50° к вертикальной оси СА. При этом в поле зрения камеры в центральной части панорамы попадает край посадочной платформы 9, имеющей индикаторную раскраску.

Для повышения надежности получения изображения в неблагоприятных условиях (пониженная освещенность, очень малые контрасты и др.) на СА спаружи были установлены два источника искусственного света 10, освещающих локальные зоны поверхности в двух секторах панорамы. Эти зоны, а также след полосы обзора на поверхности показаны штриховыми линиями на рис. 2 (вид СА сверху, обозначения те же, что и на рис. 1).

На этом же рисунке видно, как выполнена раскраска платформы, и показано рабочее положение радиационного плотномера 11.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЛОК-СХЕМА КАМЕРЫ

Основные параметры панорамной камеры были выбраны на основании значительного объема исследований по моделированию условий работы и оптимизации системы передачи, что было особенно необходимо при большой неопределенности исходных данных. Передача видеoinформации с СА велась семиразрядным двоичным кодом (один разряд служебный) со скоростью 256 дв.ед./с, или 36,6 телевизионных элементов в секунду. Допустимая скорость передачи и номинальное время существования СА на поверхности (30 мин) определили параметры разложения изображения в установленном угле панорамного обзора.

Ниже приводятся основные параметры камеры.

Число элементов в строке (без обратного хода)	115
Число строк в панораме	517 ± 13
Число элементов в обратном ходе	13
Время передачи строки, с	3,5
Время передачи панорамы, мин	$30 \pm 0,9$
Диапазон рабочих освещенностей (белая поверхность, источник типа А), лк	15—15 030
Диапазон передаваемых плотностей	0—1,2 (1,5)
Число уровней квантования видеосигнала	64
Масса камеры, кг	5,8
Потребляемая мощность, Вт	5

Функциональная блок-схема камеры дана на рис. 3. Она состоит из: *оптико-механической части*, включающей оптическую систему, привод развертывающего устройства, устройства калибровки светоприемника;

схемы, формирующей видеосигнал, в которую входят: светоприемник, видеоусилитель, блок питания светоприемника, система автоматической регулировки чувствительности (АРЧ);

управляющей схемы в составе блока автоматики и блока синхронизации развертки.

Все приборы СА, в том числе и панорамная камера, работают в автоматическом режиме и управляются программно-временным устройством, которое после посадки подает на камеру команду на включение. После этого собственная автоматика камеры производит включение и выключение осветителей в заданных секторах обзора и реверсирование развертки по достижении камерой крайних положений угла панорамирования.

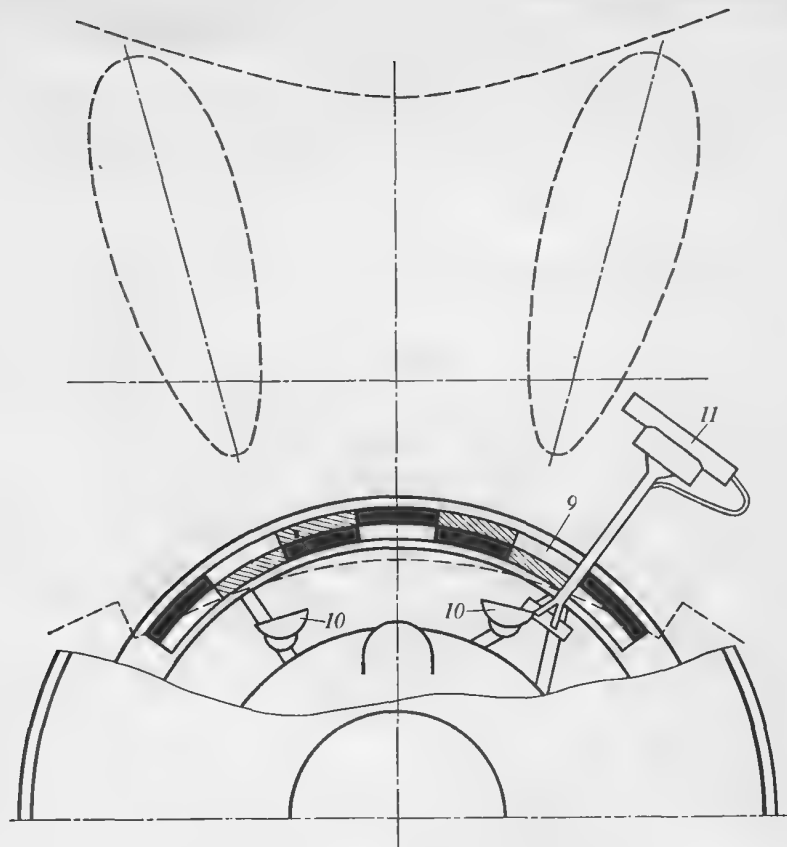


Рис. 2

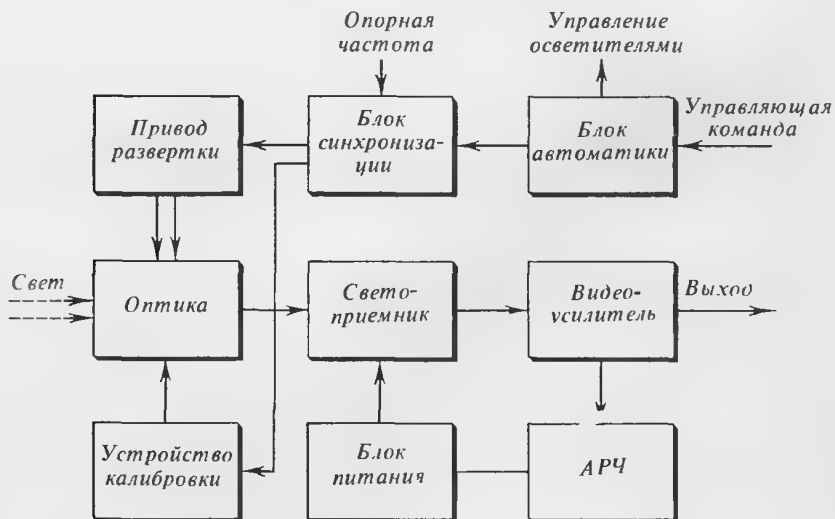


Рис. 3

Вид на спускаемый аппарат сверху

Зоны искусственной подсветки и границы полосы обзора на поверхности показаны штриховой линией

Функциональная блок-схема камеры

С выхода камеры видеосигнал подается на кодирующее устройство и далее на передатчик. Каждые 4 мин видеосигнал прерывается и в канале связи поступает телеметрическая информация со всех научных приборов СА. Панорамная развертка в это время не прекращается, что приводит к потере 4—5 строк изображения на каждый цикл измерений. В это же время передается следующая информация о работе камеры:

- изменение уровня автоматической регулировки чувствительности;
- изменение азимутального угла;
- наличие строчной развертки;
- наличие видеосигнала;
- моменты включения и выключения осветителей;
- температура камеры.

Кроме того, такие параметры, как уровень калибровочного сигнала, потребляемый осветителями ток и др., передаются во время обратного хода каждой строки.

ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Оптическая схема камеры приведена на рис. 4. Камера работает через иллюминатор 1, имеющий цилиндрическую форму, с толщиной стекла (кварц) 10 мм. Пучок лучей от поверхности, проходя через иллюминатор, становится расходящимся в сагиттальном сечении, так как иллюминатор представляет собой цилиндрическую линзу. Расходящийся пучок падает на сканирующее зеркало 2 и, отражаясь от него, попадает на компенсирующую цилиндрическую линзу 3, передний фокус которой совпадает с задним фокусом иллюминатора.

После линзы 3 пучок снова становится параллельным и, отражаясь от поворотного зеркала 4, проходит через объектив 5 с фокусным расстоянием 28 мм и относительным отверстием 1 : 2. В плоскости изображения стоит диафрагма 6, которая является развертывающим элементом, формирующим апертурную характеристику прибора. После диафрагмы пучок попадает на светоприемник 7. На время обратного хода строчной развертки световой поток перекрывается гребешком обтюратора 8. В это же время фотодиод 9 засвечивается лампой накаливания 10 через отверстие на обтюраторе и формирует электрический импульс начала обратного хода. Во время обратного хода происходит калибровка прибора. Для этой цели свет от лампы 10, яркость которой стабилизирована, с помощью световода 11 подается на светоприемник.

Сканирующее зеркало совершает колебательное движение (строчная развертка), отклоняя световые пучки на угол $\pm 20^\circ$ по пилообразному закону с линейной угловой скоростью и обратным ходом, составляющим 10% от периода строки. Одновременно сканирующее зеркало поворачивается вокруг оси панорамирования. Конструкция камеры позволяет производить полный панорамный обзор в угле 360° , однако поле зрения, не закрытое элементами СА, составляет величину, примерно в два раза меньшую, поэтому панорамная развертка ограничена углом $180 \pm 4^\circ$.

Приводом оптико-механической части служит двигатель постоянно-го тока, скорость вращения которого стабилизирована с помощью сервосистемы с опорой на частоту, подаваемую от бортового хронизатора.

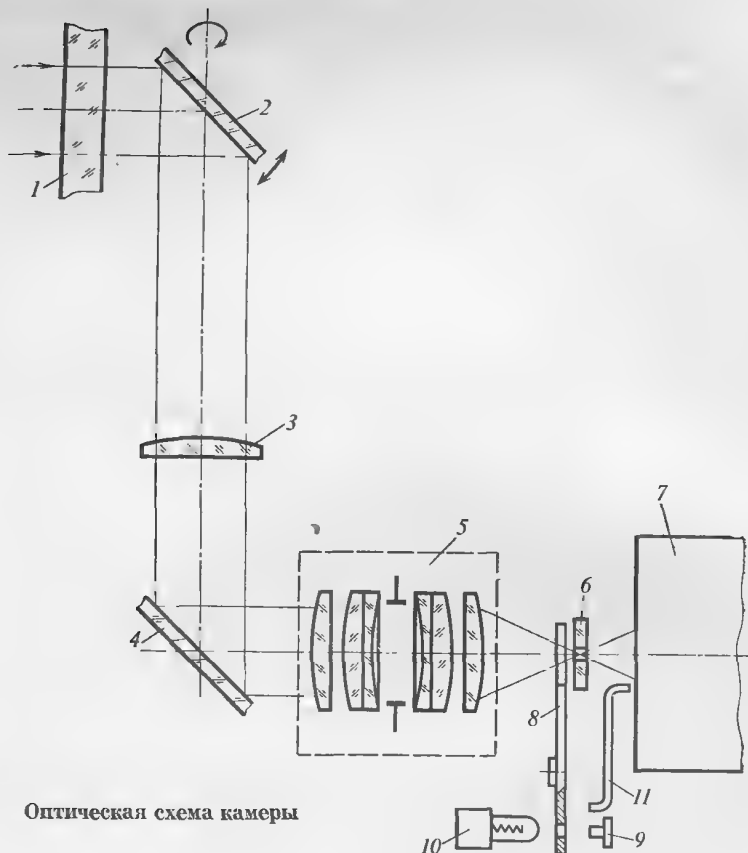


Рис. 4

Оптическая схема камеры

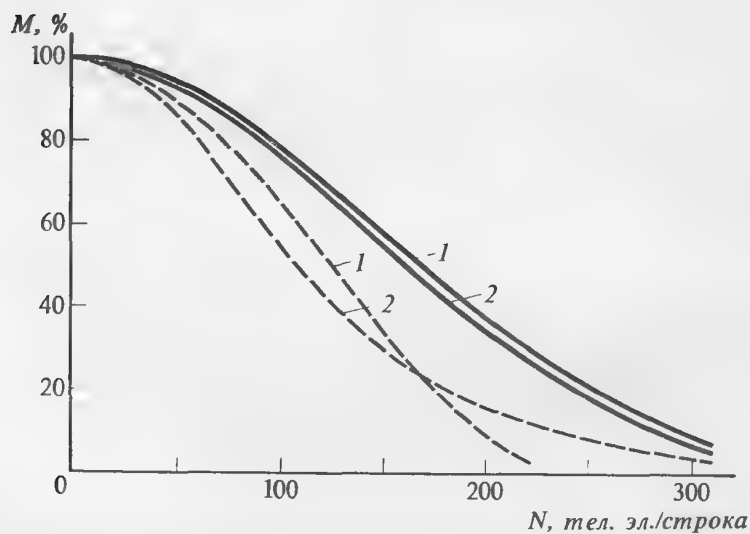


Рис. 5

Апертурные характеристики камер «Венеры-9» (1) и «Венеры-10» (2)
 Штриховая линия — для расстояния 1 м от иллюминатора, сплошная — для расстояния 2 м и более

Апертурные характеристики двух камер показаны на рис. 5. Номинальная угловая разрешающая способность $21'$ соответствует четкости 115 элементов в строке и ограничивается, как это видно, не апертурной характеристикой камер, а частотой дискретизации видеосигнала (в строчном направлении) и заданным шагом панорамной развертки. В то же время большая глубина модуляции M от мелких деталей, которая обеспечивается данными апертурными характеристиками, дает возможность получить изображение, наиболее резкое для выбранных параметров разложения.

При угловом разрешении $21'$ в ближней зоне могут быть обнаружены детали поверхности с размерами около 10 мм. Достоверно будут различаться детали, имеющие размеры в несколько раз больше.

Объективы камер настроены на гиперфокальное расстояние, благодаря чему можно получить резкое изображение предметов, находящихся на расстоянии от 800 мм до ∞ от иллюминатора, т. е. во всех зонах панорамного обзора, включая край посадочной платформы.

ФОРМИРОВАНИЕ ВИДЕОСИГНАЛА

Для преобразования светового потока в электрический сигнал используется фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-114. Его спектральная характеристика (S — относительная спектральная чувствительность) (рис. 6) удовлетворительно сочетается с предполагаемым спектральным составом естественного (солнечного) освещения на поверхности Венеры [2]. При этом спектральном составе с учетом всех характеристик камеры на ее выходе обеспечивается отношение сигнал/шум $\Psi \geq 280$ при освещенности 45 лк на белом. Эта величина освещенности взята в виде контрольного параметра при настройке камеры, поскольку она близка к ожидаемому минимальному значению.

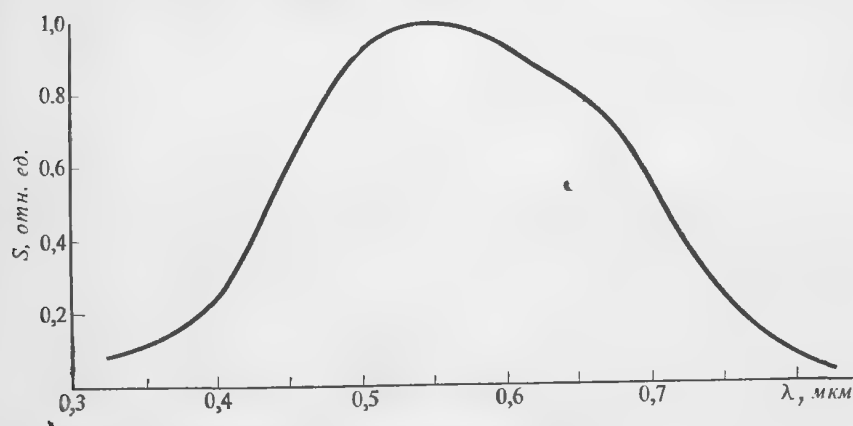


Рис. 6

Спектральная характеристика светоприемника ФЭУ-114



Рис. 7

Внешний вид камеры

При этом контрастная чувствительность системы определяется в основном каналом передачи, в котором производится квантование выходного видеосигнала на 64 уровня.

Ожидаемые контрасты на поверхности Венеры в основном должны были лежать в диапазоне от десятых долей до единиц процентов. Но, несмотря на общую тенденцию к пониженному контрасту деталей, возможно было появление и высококонтрастных объектов. Ими могли быть камни или другие образования с крутыми стенками (контрастность до 0,5 и более даже при рассеянном освещении), участки поверхности, подсвеченные искусственно (контраст до ~ 1 при условии низкой естественной освещенности), элементы конструкции спускаемого аппарата (контраст 0,3—0,9).

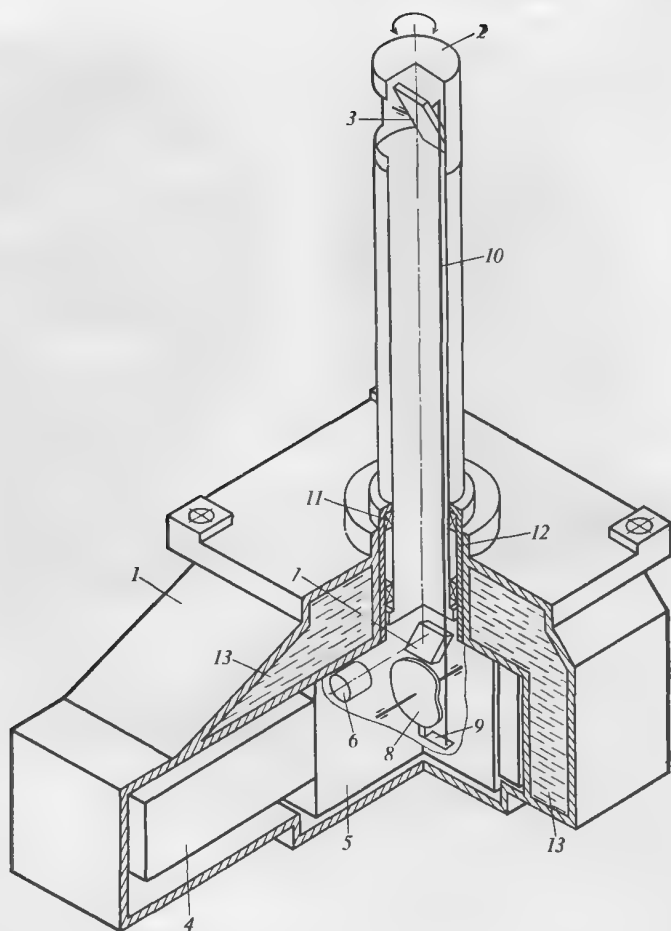


Рис. 8

Конструкция камеры (разрез)

Для компромиссного удовлетворения требованиям возможно более высокой контрастной чувствительности и широкого динамического диапазона системы при 64 уровнях квантования видеосигнала была использована неравномерная, близкая к логарифмической шкала квантования. Заданная неравномерность формируется за счет установки ФЭУ в нелинейный режим преобразования свет — сигнал и дополнительно нелинейностью видеоусилителя. Кодировочное устройство системы работает в линейном режиме. Камеры настраивались с некоторым отклонением (см. с. 69). Эти характеристики обеспечивают неравномерную контрастную чувствительность по диапазону. Например, для камеры «Венеры-10» при максимальном передаваемом контрасте $K_{\max} = 0,94$ ($D_{\max} = 1,2$) контрастная чувствительность на уровне черного составляет $K_{\text{пч}} = 0,2$, на уровне

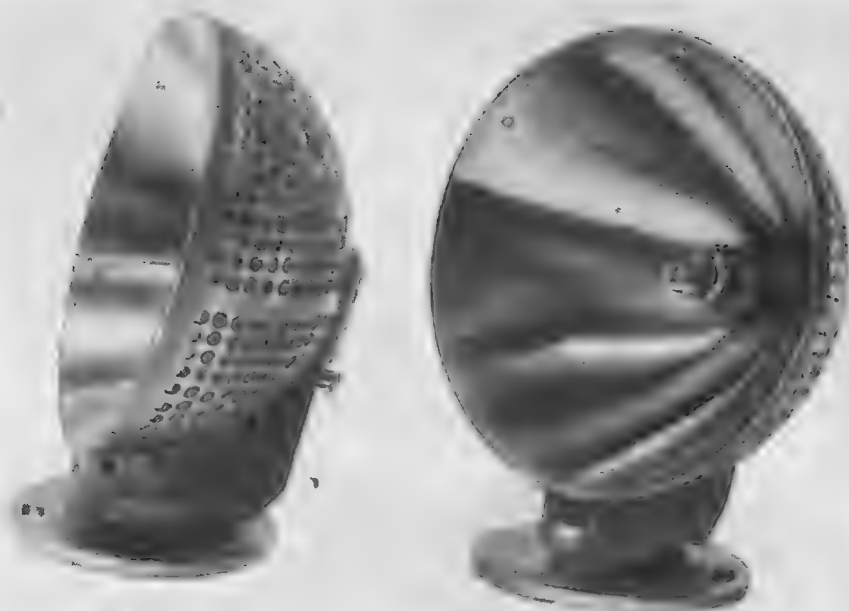


Рис. 9

Внешний вид осветителей

не белого $K_{\text{пб}} = 0,09$, а на уровне 0,2 от максимального сигнала $K_{\text{пб},2} = 0,02$.

С целью адаптации камеры к заранее неизвестным реальным условиям освещения, а также к изменению ее внутренних параметров под воздействием различных факторов используется автоматическая регулировка чувствительности. Она осуществляется путем изменения высоковольтного питания и, следовательно, коэффициента усиления ФЭУ пропорционально средней составляющей видеосигнала, идущей через цепь обратной связи от выходного усилителя камеры.

На основании работы [2] освещенность поверхности Венеры в точке посадки принималась лежащей в диапазоне 960—4000 лк, а альбедо 0,05—0,5. Однако диапазон работы системы АРЧ должен быть шире, поскольку, например, альбедо поверхности было точно неизвестно. Возможны были и другие отклонения от исходных данных. Практически, как показали эксперименты, АРЧ обеспечивает постоянство выходного сигнала в диапазоне освещенности 15—15 000 лк на белом.

КОНСТРУКЦИЯ КАМЕРЫ

Внешний вид камеры показан на рис. 7, разрез ее конструкции — на рис. 8. Конструктивно камера разбивается на две части: основной корпус 1 и перископическое устройство 2. Перископическое устройство 2

выносит за пределы теплоизоляционных оболочек СА сканирующее зеркало 3 и располагается внутри цилиндрического иллюминатора в зоне, где температура достигает 475° С. Основной корпус 1 и входящие в него электронные блоки 4, 5, элементы оптики 6, 7 и механические узлы 8, 9 (на рис. 8 показаны не все блоки и элементы) находятся в более благоприятной зоне, где температура за время работы СА на поверхности не превышает 40—50° С. Для защиты основной части камеры от теплового потока, проникающего через иллюминатор, принят ряд конструктивных мер:

перископическое устройство 2 выполнено в виде тонкостенной трубы из материала с низкой теплопроводностью. Качание зеркала 3 от кулачка 8 и толкателя 9 производится через проволочную тягу 10 длиной 250 мм;

труба перископического устройства 2, вращающаяся при панорамном обзоре, устанавливается на шарикоподшипниках 11, между которыми имеется радиатор 12, обеспечивающий передачу тепла на корпус камеры 1;

в корпусе камеры по периметру сделаны герметичные полости, заполняемые солями лития 13, обладающими большой теплоемкостью при температуре плавления $25 \pm 3^\circ \text{C}$.

Масса прибора 5,8 кг, включая заправку солями лития (2,1 кг).

УСТРОЙСТВА ПОДСВЕТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Осветители выполнены в виде параболических отражателей с лампой накаливания в качестве источника света. Здесь используются высокоэффективные лампы с галогенным циклом типа КГМ-27-100. Важной для данного применения особенностью галогенных ламп накаливания является высокая рабочая температура их кварцевого баллона, необходимая для осуществления галогенного цикла регенерации нити, а также повышенная механическая прочность баллона, имеющего малые размеры.

Это позволило создать осветители, работающие в незащищенном виде в условиях Венеры.

Внешний вид осветителей показан на рис. 9. Ниже приведены их основные характеристики.

Номинальное напряжение питания, В	27
Потребляемая мощность, Вт	100
Световой поток, лм	3400
Масса, г	2×300

Распределение освещенности, даваемое приборами, замеренное на площадке, перпендикулярной их оси и установленной на расстоянии 1 м, дано на рис. 10. Ввиду неопределенности внешних условий фокусировка светильников (I и II) в паре производилась неодинаково.

Осветители включаются от программного устройства, механически связанного с осью вращения панорамной камеры. Угловая диаграмма их включения дана на рис. 11.

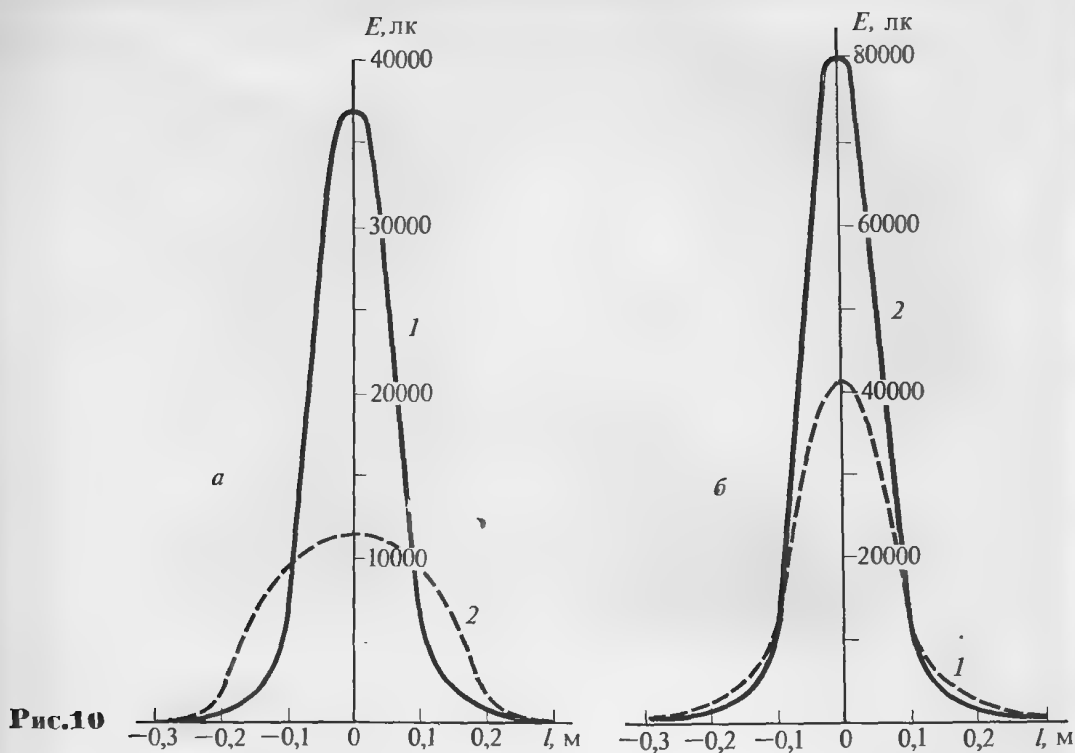


Рис.10

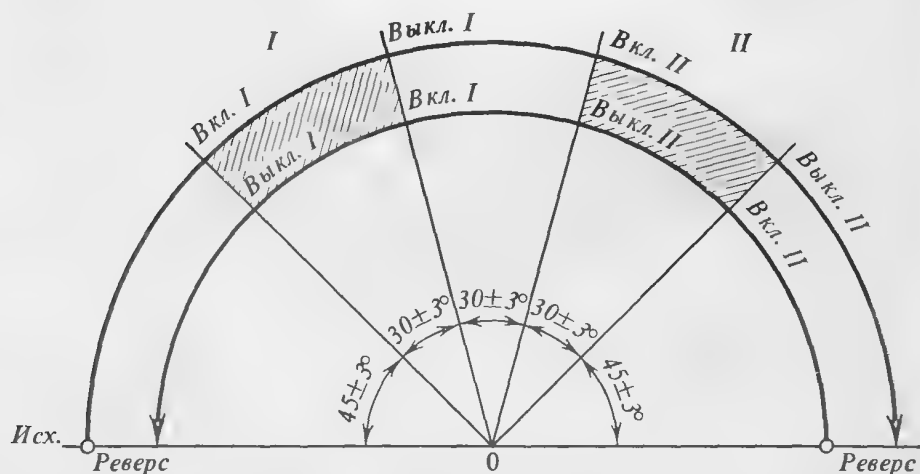


Рис.11

Распределение освещенности, даваемое осветителями станций «Венера-9» (а) и «Венера-10» (б)

1 — левый осветитель, 2 — правый (по панораме)

Угловая диаграмма включения осветителей

Со станций «Венера-9» и «Венера-10» были получены панорамы, показанные на фото (см. рис. 1—4 след. раздела). Исходное положение первой камеры было сдвинуто на 6° от нулевого значения угла панорамной развертки, поэтому первая панорама охватывала угол 174° и передавалась 29,3 мин. Затем панорамная развертка реверсировалась, и была повторно передана часть поверхности в угле 124° . Общее время телевизионной передачи со станции «Венера-9» составило 50 мин.

Со станции «Венера-10» сигнал изображения передавался 44,5 мин. Была передана одна полная панорама около 184° и повторно два участка, в начале и в конце: 63° и 17° .

Контраст изображений значительно превысил ожидаемый вследствие больших уклонов элементов поверхности и разности альбедо отдельных участков, попавших в поле зрения камер. Сигнал от наиболее ярких объектов, таких, как небо и светлые элементы конструкции СА, вышел за пределы динамического диапазона.

На обеих панорамах действие искусственной подсветки проявляется слабо вследствие весьма высокой естественной освещенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аведущий В. С., Маров М. Я., Мошкин Б. Е., Экономов А. П. — Докл. АН СССР, 1973, 213, № 4, 77.
2. Бирюков Ю. Л., Панфилов А. С. — Космич. исслед., 1974, 12, № 6, 903.
3. Панфилов А. С. Расчет оптических характеристик объектов съемки. Пример съемки поверхности Венеры: Препринт ИКИ АН СССР, Д-121. М., 1972.
4. Панфилов А. С. — Космич. исслед., 1975, 13, № 4, 612.
5. Селиванов А. С., Говоров В. М., Титов А. С., Чемоданов В. П. — Техника кино и телевидения, 1968, № 1.
6. Селиванов А. С., Говоров В. М., Чемоданов В. П., Оводкова С. Г. — Техника кино и телевидения, 1972, № 5, 43.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

Съемка поверхности Венеры со спускаемых аппаратов «Венера-9» и «Венера-10» производилась оптико-механическими панорамными телевизионными камерами, аналогичными по принципу работы камерам, которые ранее применялись для исследования Луны [1—3]. Их описание дано в начале данной главы. Программой работы аппаратов «Венера-9» и «Венера-10» предусматривалась передача по одной панораме, однако за счет имеющихся ресурсов бортовая аппаратура смогла проработать значительно больше времени, что позволило каждой станции передать повторно часть панорамы.

Для передачи изображений использовалась цифровая радиопереводная линия, по которой передавались видеосигналы с 64 уровнями квантования. Этим обстоятельством, а также тем, что изображение имело 115 элементов разложения в строке, определялся мозаичный характер

структуры принятых изображений со ступенчатыми очертаниями образований и заметными перепадами плотности.

Первые снимки были переданы 22 октября 1975 г. со станции «Венера-9». На Земле была получена полная панорама поверхности Венеры в режиме прямого хода (рис. 1) и часть панорамы в режиме обратного хода (рис. 2). В левой части первой панорамы имелись сбои изображения.

Кроме этого, в отдельных местах на панораме заметны помехи в виде отдельных белых или черных точек. Широкая шумовая полоса на рис. 2 соответствует кратковременному выключению бортовой аппаратуры, предусмотренному программой.

Вторая панорама, уже со станции «Венера-10», была получена 25 октября 1975 г. в режиме обратного хода (рис. 3). Кроме этого, были получены еще две части этой панорамы (начало и конец) в режиме прямого хода. Большая из них (конец панорамы) приведена на рис. 4.

При передаче телевизионного изображения одновременно передавалась телеметрическая научная и объектовая информация. Для этого через каждые 64 строки на 4—5 строк изображение прерывалось и вместо него передавались телеметрические данные («врезки»). На приведенных панорамах они имеют вид регулярных вертикальных полос.

Несмотря на хорошее качество полученных панорам, было принято решение подвергнуть их дополнительной цифровой обработке. В задачу обработки на первом этапе входили операции по устранению телеметрических врезок, отдельных сбоев и шумов, а также улучшение общего визуального качества снимков на счет увеличения кажущегося числа элементов разложения и числа уровней квантования сигнала и выделение мелких деталей поверхности Венеры. Обработка панорам осуществлялась на специальном комплексе, состоящем из ЦВМ и аппаратуры ввода и вывода информации. Ввод информации, полученной из Центра дальней космической связи в виде магнитной ленты с цифровой записью, обеспечивал строгую фазировку строк. Рассмотрим сущность некоторых операций цифровой обработки.

УСТРАНЕНИЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ВРЕЗОК

В связи с тем, что телеметрические врезки закрывают различные участки панорамы на прямом и обратном ходу, стало возможным путем цифрового монтажа устранить большую часть врезок, вставив вместо них соответствующие фрагменты из повторяющихся панорам.

Так как на прямом и обратном ходу развертка изображения происходит в противоположных направлениях, то влияние бортового фильтра низкой частоты и схемы АРЧ на видеосигнал оказалось различным. Вследствие этого вставленные фрагменты оказались отличающимися по плотности от основной панорамы (см. рис. 5).

Для устранения этого эффекта в текущие значения всех строк вмонтированных участков была введена аддитивная поправка $\tilde{\Delta}(x)$, полученная путем сглаживания функции $\Delta(x) = [\Delta_n(x) + \Delta_p(x)]/2$, где

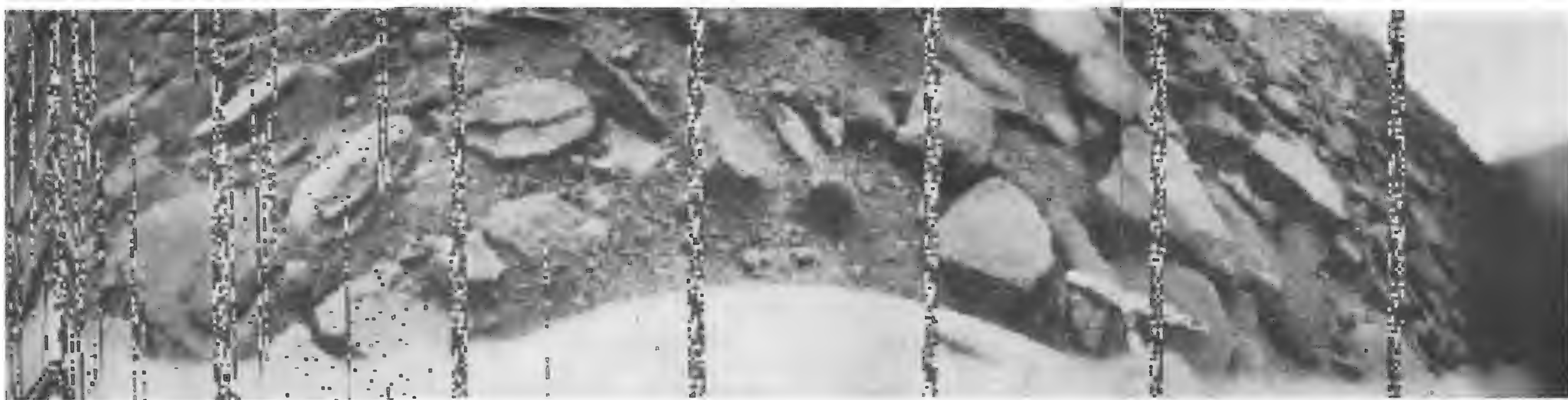


Рис. 1

Панорама, принятая с аппарата «Венера-9»

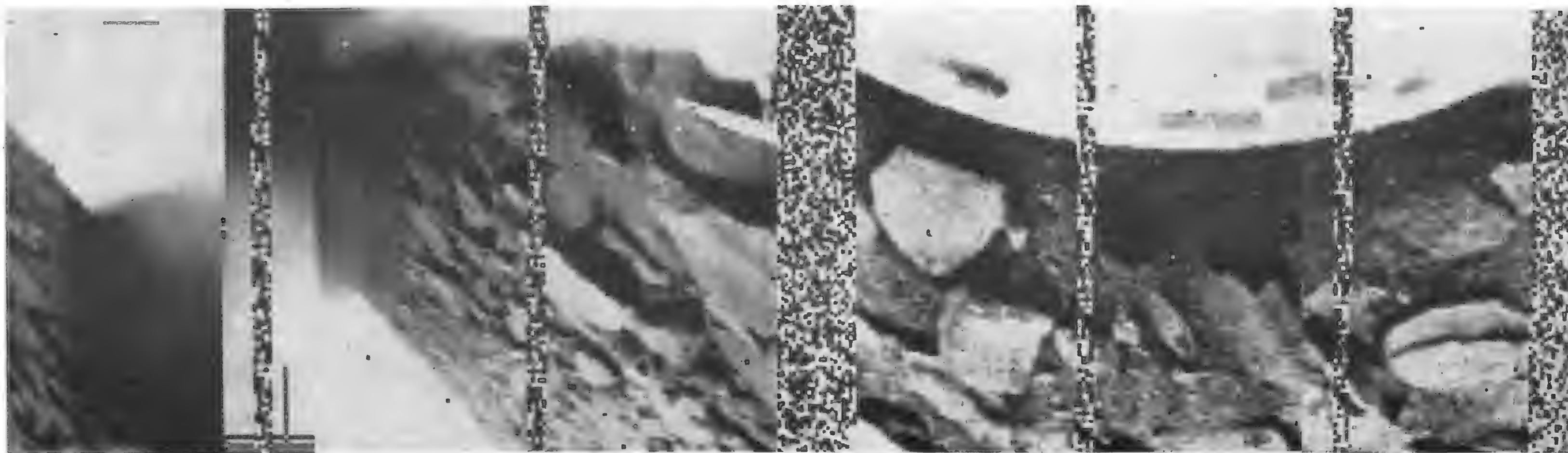


Рис. 2

Часть панорамы «Венера-9», снятой в режиме обратного хода



Рис. 3

Панорама, принятая с аппарата «Венера-10»



Рис. 4

Часть панорамы «Венеры-10», снятой в режиме прямого хода

$\Delta_n(x)$ и $\Delta_p(x)$ — разности значений яркости в строках, образующих левую и правую границы фрагмента соответственно. На рис. 6 приведены указанные функции для фрагмента, изображенного на рис. 5.

В тех случаях, когда методом монтажа нельзя было устранить врезку, пришлось прибегнуть к цифровой «ретуши». Такая же ретушь была применена и для исправления левой части первой панорамы, которая имела свои искажения. С этой целью в ЦВМ были получены матрицы величин яркости элементов участков, внутри которых были места с потерянной информацией за счет врезок или сбоев. Далее путем соединения линиями соседних точек в матрицах с одинаковыми числами строились изофоты. В местах, где отсутствовала информация, эти изофоты прерывались. Эти разрывы ликвидировались путем дополнения матрицы числами, соответствующими прерванным изофотам.

При реализации этого метода возникли затруднения из-за большого количества изофот, поэтому «ретушь» пришлось производить поэтапно, сначала для грубой шкалы квантования по уровню, а затем для более точных шкал. Это позволило четко найти направление основных изофот и использовать их как ориентиры для построения всех остальных изофот. На рис. 7 приведен один из фрагментов до цифровой «ретуши» и после нее.

УЛУЧШЕНИЕ ОБЩЕГО ВИЗУАЛЬНОГО КАЧЕСТВА

Чтобы устранить мозаичный характер изображения, необходимо было привести его к новому стандарту разложения, а также увеличить число уровней квантования по яркости. Эта операция выполнена с помощью интерполяционного фильтра, действие которого свелось к тому, что между каждыми двумя элементами изображения как по строке, так и по панораме введены семь новых элементов, яркость которых определена методом линейной интерполяции по шкале с 512 значениями яркости. Таким образом число кажущихся элементов в строке и в панораме, а также уровней квантования яркости увеличилось в 8 раз.



Рис. 5

Фрагмент панорамы «Венеры-9» с монтажом врезки

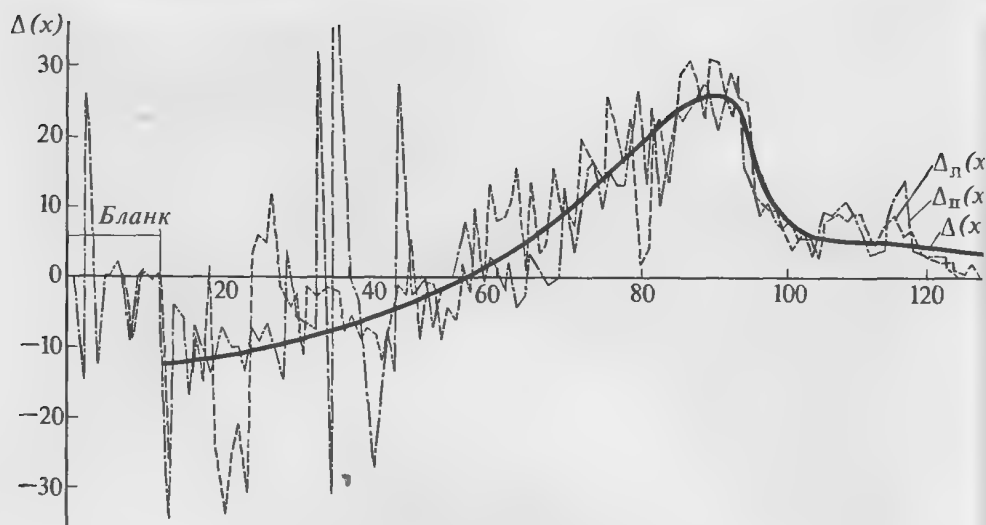


Рис. 6



Рис. 7

Распределение плотности изображения во врезке на рис. 5

Фрагмент панорамы «Венеры-10»

а — до цифровой «ретуши», б — после нее

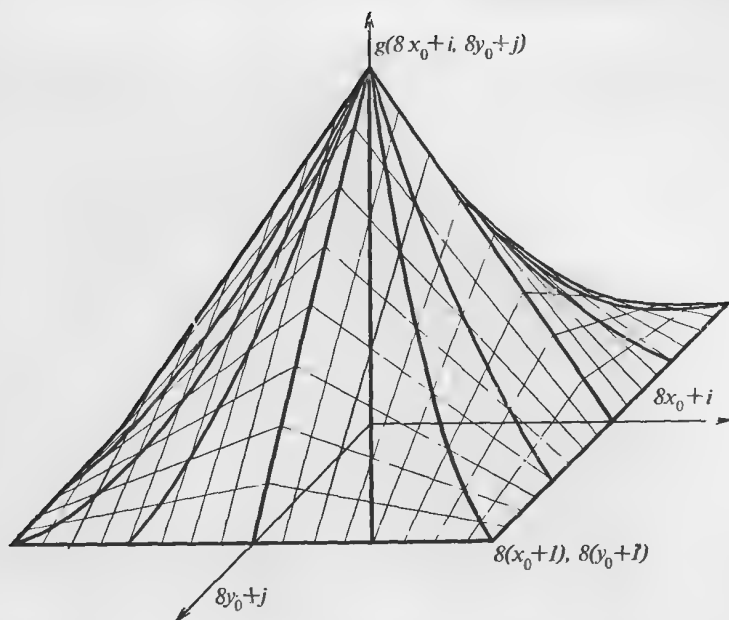


Рис. 8

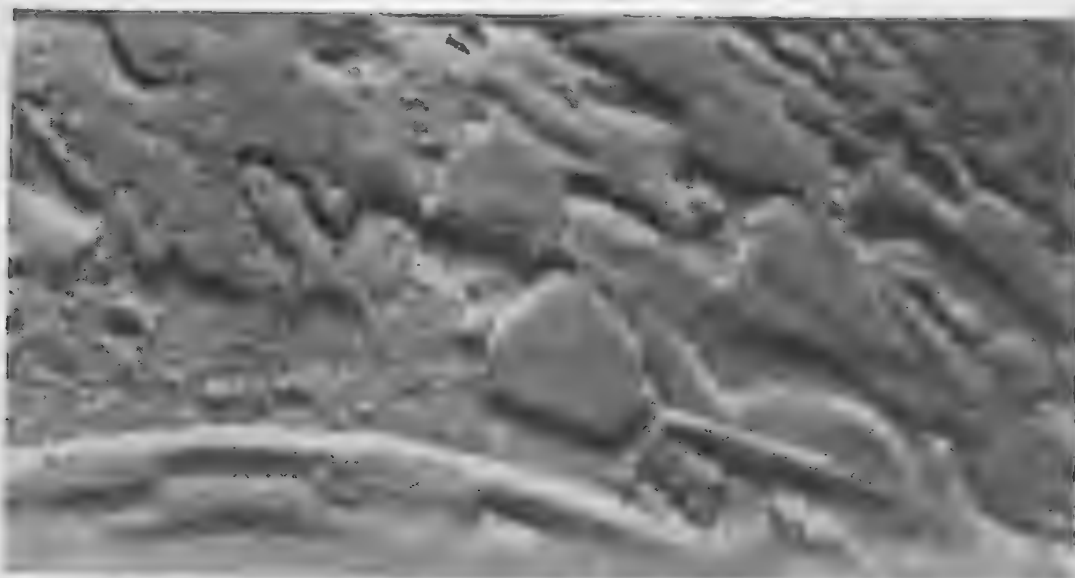


Рис. 9

Импульсная характеристика фильтра

Фрагмент продифференцированной панорамы «Венеры-9»

Указанный интерполяционный фильтр выполнен по нерекурсивной схеме, и его действие описывается следующим образом. Пусть $S(x, y)$ — яркость точки исходного изображения, которая на трансформированном изображении имеет координаты $(8x + i; 8y + j)$, где $i, j = 0, 1, \dots, 7$. Тогда действие фильтра будет описываться разностным уравнением в виде билинейной формулы.

$$\hat{S}(8x + i, 8y + j) = A + Bi + Cj + Dij,$$

где

$$A = S(x, y),$$

$$B = 1/8 [S(x + 1, y) - S(x, y)],$$

$$C = 1/8 [S(x, y + 1) - S(x, y)],$$

$$D = 1/64 [S(x + 1, y + 1) - S(x + 1, y) - S(x, y + 1) - S(x, y)].$$

Такой фильтр имеет импульсную характеристику $g(8x_0 + i, 8y_0 + j)$ (отклик на сигнал $U(x, y) = 1$ при $x = x_0, y = y_0$ и $U(x, y) = 0$ во всех остальных точках), изображенную на рис. 8. Как видно из рисунка, примененный фильтр является анизотропным — его свойства в различных направлениях различны. В частности, в направлении под углом 45° к строкам этот фильтр выполняет не линейную, а более грубую интерполяцию, вследствие чего в наклонных направлениях сглаживание производится хуже.

Основным звеном, с помощью которого осуществлено выделение мелких деталей, был цифровой фильтр, алгоритм которого описывался разностным уравнением

$$S_{\text{вых}}(x) = [S'_{\text{вых}}(x)] \cdot M + S_{\text{вх}}(x),$$

где

$$S'_{\text{вых}}(x) = S_{\text{вх}}(x) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_{\text{вх}}(x - i) + P,$$

N — коэффициент усреднения, M — масштабный коэффициент, P — константа, $S_{\text{вых}}(x)$ — значение выходного сигнала, $S_{\text{вх}}(x)$ — значение входного сигнала в тот же момент времени.

Фильтр может работать в режиме выравнивания постоянной составляющей и в режиме высокочастотной коррекции.

В режиме коррекции высоких частот из входного сигнала $S_{\text{вх}}(x)$ вычитался сигнал соответствующей низкочастотной части спектра. Полученный результат $S'_{\text{вых}}(x)$ умножался на масштабный коэффициент M и после этого суммировался с входным сигналом. Меняя коэффициенты N и M , можно в различной степени подчеркивать мелкие детали поверхности.

Константа P выбирается равной требуемому значению постоянной составляющей. Для выравнивания постоянной составляющей коэффициент усреднения N выбирается максимально возможным. При



Панорамы «Веры-9» (а) и «Веры-10» (б) после цифровой обработки

малых значениях N можно получать сильно продифференцированный снимок. Пример такого снимка приведен на рис. 9.

После проведения цифровой обработки панорамы поверхности Венеры приняли вид, показанный на рис. 10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Первые панорамы лунной поверхности. М.: Наука, 1966. Т. 1.
2. Первые панорамы лунной поверхности. М.: Наука, 1969. Т. 2.
3. Передвижная лаборатория на Луне «Луноход-1». М.: Наука, 1971.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ

Для обработки телевизионных панорам участков поверхности Венеры, полученных с посадочных аппаратов «Венеры-9» и «Венеры-10», в Центральном научно-исследовательском институте геодезии, аэросъемки и картографии (ЦНИИГАиК) были разработаны графоаналитические методы, позволяющие в конечном итоге построить крупномасштабные топографические планы участков поверхности Венеры. При аналитической обработке телевизионных панорам, включающей в себя определение угловых элементов внешнего ориентирования панорам и вычисление цифровых моделей местности, были составлены специальные программы для ЭВМ ЕС-1030 на алгоритмическом языке Фортран-IV ДОС/ЕС.

С целью получения функциональных зависимостей, позволяющих вычислить углы наклона оптико-механических телевизионных камер по отношению к поверхности планеты и цифровые модели местности, рассмотрим необходимые геометрические соотношения и используемые при этом системы координат.

Система координат телевизионной панорамы oxz . Начало координат находится в точке панорамы, через которую проходит центральный луч сканирования, ось oz направлена в сторону изображения неба, а ось ox — вправо. Так как изображение поверхности на панораме строится с известным числом строк, то центральный луч сканирования совпадает с серединой центральной строки на панораме, т. е. при нечетном числе строк n за центральную принимается строка под номером $(n + 1)/2$. При четном числе строк за начало координат целесообразно принимать точку, расположенную в центральной части панорамы.

Система координат оптико-механической камеры $Sxyz$. Начало координат этой системы находится в центре проектирования камеры — точке S , ось Sy совпадает с плоскостью средних лучей сканирования, проходящих через точки панорамы, лежащие на оси ox системы oxz . Направление Sz системы совпадает с осью панорамирования, перпендикулярной плоскости Sxy . Система координат $Sxyz$ правая.

Пространственное положение точек местности определяется в некоторой *топоцентрической системе координат $SXYZ$* , в которой плоскость SXY совпадает с плоскостью горизонта, а ось SY — с проек-

цией центрального луча сканирования на эту плоскость. Начало системы находится в центре проектирования оптико-механической телевизионной камеры, система $SXYZ$ правая.

В системах координат были использованы направления координатных осей, совпадающие с направлениями, принятыми в наземной стереофотограмметрической съемке.

Для нормального случая съемки (системы $SXYZ$ и $Sxyz$ совпадают), при заданной высоте фотографирования h и условии, что сфотографированный участок местности представляет собой плоскость, вектор пространственных координат точек $\Phi = (XYZ)^T$ в топоцентрической системе $SXYZ$ определяется из выражения

$$\Phi = h/Z_t \cdot R_t, \quad (1)$$

где $R_t = (X'_t, Y'_t, Z'_t)^T$ — вектор направления на точку местности в топоцентрической системе координат $SXYZ$:

$$R_t = \begin{pmatrix} \sin \lambda_t \cos \beta_t \\ \cos \lambda_t \cos \beta_t \\ \sin \beta_t \end{pmatrix}, \quad (2)$$

λ_t, β_t — сферические координаты луча сканирования в системе координат $Sxyz$ для нормального случая съемки.

При наклоне системы съемочной камеры $Sxyz$ относительно топоцентрической системы $SXYZ$ в формулах (1) вектор R_t должен быть выражен через сферические координаты точек наклонной панорамы λ и β и углы поперечного наклона центрального луча сканирования к плоскости горизонта ω и крена вокруг центрального луча сканирования κ , т. е.

$$R_t = A \cdot R, \quad (3)$$

где A — матрица направляющих косинусов системы $Sxyz$ относительно системы $SXYZ$:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \kappa & 0 & -\sin \kappa \\ \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega & \sin \omega \cos \kappa \\ \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega & \cos \omega \cos \kappa \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$R = (X', Y', Z')^T$ — вектор направления на точку местности в системе координат съемочной камеры:

$$R = \begin{pmatrix} \sin \lambda \cos \beta \\ \cos \lambda \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Сферические координаты точек вычисляются из соотношений

$$\lambda = \frac{x}{l_x} \alpha_x, \quad \beta = \frac{z}{l_z} \alpha_z, \quad (6)$$

где l_x и l_z — измеренные на панораме расстояния вдоль осей x и z , соответствующие углам обзора панорамы α_x и α_z .

Для сканирующих систем, установленных на посадочных аппаратах «Венеры-9» и «Венеры-10», $\alpha_x = 180^\circ$ и $\alpha_z = 40^\circ$.

Кроме того, так как высота фотографирования в предстартовый период измеряется в *строительной системе координат* посадочного аппарата, то если после посадки на поверхность планеты горизонтальная плоскость строительной системы не параллельна принятой плоскости горизонта, то в формулах (1) вместо h следует записать $h = h' \cos \varphi$, где φ — угол между вертикальной осью строительной системы и осью Z принятой топоцентрической системы. Горизонтальной плоскостью строительной системы у посадочных аппаратов «Венеры-9» и «Венеры-10» служила плоскость посадочного кольца, а направления осей координат были закреплены на ней реперными метками.

Как видно из приведенных геометрических соотношений, при фотограмметрической обработке панорам, получаемых с помощью оптико-механических телевизионных камер, необходимо знать угловое положение этих камер относительно поверхности планеты. Одним из способов определения углового положения камер является способ с использованием линии видимого горизонта, изображенного на панорамах. В частности, при съемке поверхности Венеры с посадочных аппаратов «Венеры-9» и «Венеры-10» на полученных панорамах в левых и правых частях изображен видимый горизонт. Поэтому угловое положение оптико-механических камер в топоцентрической системе координат было определено по линии видимого горизонта.

Из выражений (2) — (5) следует, что

$$\sin \beta_i = \cos \omega \sin \kappa \sin \lambda \cos \beta - \sin \omega \cos \lambda \cos \beta + \cos \omega \cos \kappa \sin \beta.$$

Так как для точек горизонта $\beta_i = 0$, то исходной функцией для определения углов наклона ω и κ будет служить уравнение

$$F_i = \cos \omega \sin \kappa \sin \lambda_i - \sin \omega \cos \lambda_i + \cos \omega \cos \kappa \operatorname{tg} \beta_i = 0, \quad (7)$$

где λ_i, β_i — сферические координаты, вычисленные по формулам (6) по измеренным на панораме координатам x_i и z_i точек видимого горизонта.

Решая задачу определения углов ω и κ по способу наименьших квадратов, нормальные уравнения для определения вектора поправок Δx к начальным значениям углов ω_0 и κ_0 запишем следующим образом:

$$[A^T (BK_0 B^T)^{-1} A] \Delta x + A^T (BK_0 B^T)^{-1} F_0 = 0, \quad (8)$$

где A — матрица частных производных функций (7) по значениям углов ω и κ ; B — матрица частных производных функций (7) по значениям сферических координат λ_i, β_i точек видимого горизонта; K_0 — ковариационная матрица вектора измеренных сферических координат λ_i и β_i ; F_0 — невязки функций (7).

Значения используемых при решении задач частных производных даны ниже:

$$\frac{\partial F}{\partial \omega} = -\sin \omega \sin \kappa \sin \lambda - \cos \omega \cos \lambda - \sin \omega \cos \kappa \operatorname{tg} \beta,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \kappa} = \cos \omega \cos \kappa \sin \lambda - \cos \omega \sin \kappa \operatorname{tg} \beta,$$

(9)

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sin \omega \sin \lambda + \cos \omega \sin \kappa \cos \lambda,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \beta} = \cos \omega \cos \kappa \sec^2 \beta.$$

Определение вектора поправок Δx из решения нормальных уравнений (8) проводится методом итераций.

По составленной для ЭВМ ЕС-1030 программе с использованием измеренных на панорамах координат точек видимого горизонта были вычислены углы наклона оптико-механических телевизионных камер, установленных на посадочных аппаратах «Венеры-9» и «Венеры-10». За начальные значения углов ω и κ при решении задачи были приняты величины, полученные из результатов определения элементов выставки съёмочных камер на посадочных аппаратах.

На телевизионной панораме для определения углов наклона съёмочной камеры «Венеры-9» было измерено 19 точек видимого горизонта и получены значения $\omega = 40^\circ 53'$ и $\kappa = 5^\circ 07'$.

На телевизионной панораме «Венеры-10» было измерено 17 точек видимого горизонта и получены значения $\omega = 51^\circ 11'$ и $\kappa = 4^\circ 06'$.

Основным параметром, который определяет масштаб фотограмметрических построений при обработке не перекрывающихся между собой телевизионных панорам участков поверхности планеты, является высота фотографирования в принятой топоцентрической системе координат.

Из результатов определения элементов выставки оптико-механических камер в осях строительной системы координат посадочного аппарата известны: h' — высота фотографирования, ω_0 — угол наклона центрального луча сканирования к плоскости посадочного кольца и угол κ_0 вокруг центрального луча сканирования, определяющий угловое положение плоскости сканирования в строительной системе координат.

Для углов ω и κ , вычисленных по линии видимого горизонта, и углов ω_0 и κ_0 матрица поворота, определяющая положение строительной системы координат в топоцентрической, будет иметь вид

$$A = A_\omega \cdot A_\kappa \cdot A_{\kappa_0}^T \cdot A_{\omega_0}^T. \quad (10)$$

Запишем элементы матрицы A через последовательные повороты ψ и φ :

$$A = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \cos \varphi & -\sin \psi \sin \varphi \\ -\sin \psi & \cos \psi \cos \varphi & -\cos \psi \sin \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где φ — угол между осью Z принятой топоцентрической системы и вертикальной осью строительной системы; ψ — угол между осью X принятой топоцентрической системы и проекцией центрального луча сканера на плоскость посадочного кольца.

После перемножения матриц, входящих в (10), искомые величины, выраженные через известные углы ω_0 , κ_0 , ω и κ , запишем так:

$$\cos \varphi = \cos \omega \sin \kappa \sin \kappa_0 \cos \omega_0 + \sin \omega \sin \omega_0 + \cos \omega \cos \kappa \cos \kappa_0 \cdot \cos \omega_0,$$

$$\begin{aligned}\sin \varphi &= \cos \omega \sin \kappa \sin \kappa_0 \sin \omega_0 - \sin \omega \cos \omega_0 + \\ &+ \cos \omega \cos \kappa \cos \kappa_0 \sin \omega_0, \\ \cos \psi &= \cos \kappa \cos \kappa_0 + \sin \kappa \sin \kappa_0, \\ \sin \psi &= -\sin \omega \sin \kappa \cos \kappa_0 + \sin \omega \cos \kappa \sin \kappa_0.\end{aligned}\tag{12}$$

Угол φ определяет наклон посадочного кольца посадочного аппарата относительно плоскости горизонта. Наклон посадочного аппарата «Венеры-9» к плоскости горизонта равен $\varphi = 9^\circ 48'$, а «Венеры-10» $\varphi = 2^\circ 52'$.

Заметим, что плоскость горизонта может не совпадать с уровенной поверхностью планеты. Так, судя по показаниям датчиков вертикали, посадочный аппарат «Венеры-9» произвел посадку на наклонную поверхность, а спускаемый аппарат «Венеры-10» — на поверхность, близкую к горизонтальной.

Величины этих углов φ затем используют для вычисления высот фотографирования в топоцентрической системе $h = h' \cos \varphi$.

Для съемочной камеры, установленной на посадочном аппарате «Венеры-9», высота фотографирования $h = 81,3$ см, а для съемочной камеры, установленной на посадочном аппарате «Венеры-10», $h = 82,4$ см.

Следующим этапом фотограмметрической обработки телевизионных панорам было измерение на них координат точек сфотографированных участков Венеры. Координаты точек на панораме были измерены в системе oxx с точностью 0,1 мм, массивами, принадлежащими характерным рельефным образованиям планеты. Кроме того, для получения более подробной информации о поверхности на телевизионной панораме была нанесена прямоугольная сетка с шагом 5 мм по осям ox и oz . Затем по специальной программе на ЭВМ ЕС-1030, составленной с использованием зависимостей (1) — (6), в топоцентрической системе были вычислены цифровые модели местности, включающие и координаты X и Y узлов сетки.

Вычисленные цифровые модели местности будут использованы затем для построения детальных крупномасштабных топографических планов участков поверхности Венеры.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Задачами фотометрической обработки является определение яркостей, освещенностей и контрастов элементов поверхности Венеры и ее отражательных характеристик. Кроме того, использование модельных представлений [1—3] дает возможность также определить некоторые геометрические параметры объекта съемки.

Методика фотометрической обработки основана на анализе фотоэлектрических сигналов телевизионной камеры, переданных по радиолинии на Землю. На рис. 1 показана структура сигнала, здесь b и $ч$ соответственно уровни белого и черного, $к$ — уровень калибровочного сигнала, $в$ — видеосигнал, $T_{\text{имп}}$ — длительность импульса обратного хода, $T_{\text{стр}}$ — длительность строки. Используя амплитудную характеристику (рис. 2), по относительной величине сигнала $\bar{U} = U/U_{\text{max}}$ определяем соответствующие каждому элементу изображения оптические плотности D и, следовательно, относительные яркости $\bar{B}$. Контраст между двумя элементами рассчитывается следующим образом:

$$K = (\bar{B}_{\text{max}} - \bar{B}_{\text{min}}) / \bar{B}_{\text{max}}. \quad (1)$$

Определение контраста по этой формуле вполне допустимо в пределах одной строки, так как в этом случае можно принять, что чувствительность камеры постоянна. При переходе от строки к строке в зависимости от сюжета чувствительность камеры может изменяться. Поэтому для нахождения контрастов между элементами разных строк нужно определить их абсолютные яркости, а по ним — контраст. Абсолютизация яркости в каждой строке в принципе может быть произведена по калибровочному сигналу во время обратного хода. При данной обработке абсолютизация не производилась, так как в полученных изображениях есть сочетания различных характерных образований на протяжении одной строки, а каждый тип образований можно принять фотометрически однородным в пределах панорамы.

О значениях яркости можно косвенно судить по измерениям, служащим для контроля системы автоматического регулирования чувствительности (АРЧ), результаты которых передавались в телеметрических врезках. Получаемые величины соответствуют средней освещенности, определенной в пределах участка порядка строки. Освещенности определяются в люксах по белой поверхности от источника, использовавшегося при тарировке камер, со спектром излучения, соответствующим излучению вольфрама при яркостной температуре ~ 1100 К (эффективная длина волны $0,656$ мкм). Зная спектр падающе-

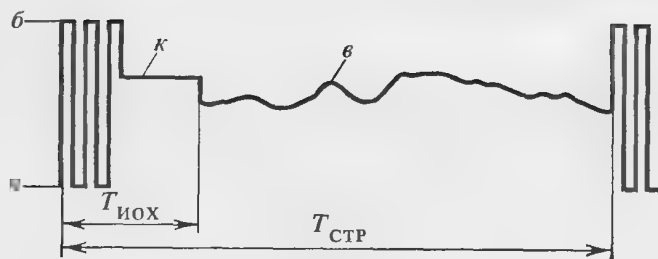


Рис. 1

Структура видеосигнала

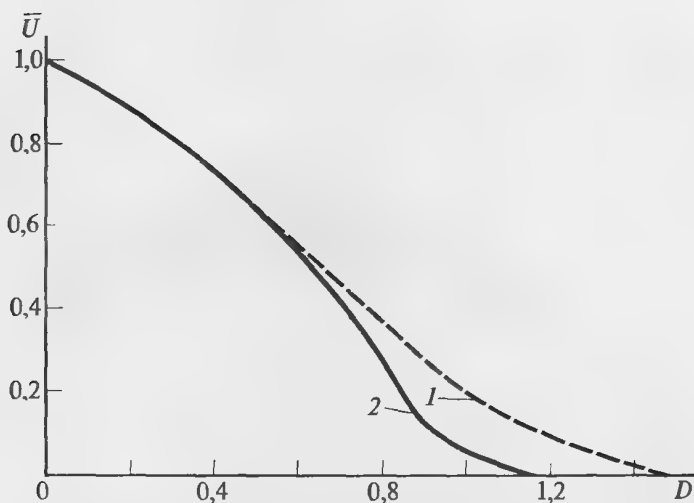


Рис. 2

Амплитудная характеристика телевизионной камеры

1 — «Венера-9», 2 — «Венера-10»

го на поверхность Венеры излучения, можно получить истинные значения освещенности белой поверхности. Ниже все данные представлены в величинах, приведенных к спектру тарировочного источника.

Определение отражательных характеристик поверхности Венеры возможно двумя способами: сравнением с эталонными поверхностями; по величине потока излучения, отраженного от поверхности, с привлечением дополнительных данных о величине падающего потока.

Здесь используется первый способ, причем эталонными поверхностями служат участки посадочной платформы и поверхности теплозащитной крышки с известными значениями альбеда.

На рис. 3 изображен вид спускаемого аппарата сверху. На посадочной платформе показана индикаторная раскраска в виде светлых (1Б), серых (1С) и темных (1Ч) прямоугольников. Поля 1Б и 1Ч имеют индикатрису отражения, близкую к ортотропной, и альбеда соответственно $A_B = 0,44 \pm 0,02$ и $A_Ч = 0,07 \pm 0,02$. Поле 1С имеет про-

Оптическая схема рассматриваемого эксперимента такова, что сопоставляются полусферически-направленные отражательные способности [4]. Известно же альbedo (направленно-полусферическая отражательная способность) эталонных поверхностей. Чтобы применить экспериментально определенную величину K для нахождения альbedo A участков поверхности Венеры, т. е. произвести в (2) замену R на A , необходимо, чтобы выполнялось условие подобия индикатрис отражения сравниваемых поверхностей. Сказанное справедливо для ровных открытых поверхностей, где влияние рельефа на яркость минимально. При наличии неровностей разделение вклада отражательных характеристик и рельефа в величину контрастов в данном эксперименте затруднено.

С другой стороны, принимая отдельные образования за однородные по отражательным характеристикам, можно попытаться определить уклоны рельефа фотометрически в рамках модельных предположений, т. е. применить к характерным структурам на поверхности Венеры полученные для них теоретические результаты в виде зависимости контрастов от величины уклона [1—3].

Имея данные по освещенности условной белой поверхности и по отражательным характеристикам поверхности Венеры, можно сделать вывод о величине освещенности (приведенной к спектру тарировочного источника) планеты в месте посадки станции.

ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрим точностные характеристики фотометрической обработки изображений. Точность определения контрастов зависит от погрешности измерения величины B . Нелинейность амплитудной характеристики при равномерной шкале квантования видеосигнала на 64 уровня приводит к разной погрешности измерения относительной яркости в зависимости от ее величины. Для камеры «Венеры-9» она равна: на уровне черного $\Delta_{\text{ч}} = \pm 21\%$; на уровне белого $\Delta_{\text{б}} = \pm 9\%$; в области максимальной крутизны амплитудной характеристики $\Delta_{\text{м}} = \pm 3\%$. Для камеры «Венеры-10» $\Delta_{\text{ч}} = \pm 20\%$; $\Delta_{\text{б}} = \pm 9\%$; $\Delta_{\text{м}} = \pm 2\%$. Следовательно, погрешность контраста переменна и зависит от яркостей сравниваемых элементов.

Погрешность альbedo поверхности Венеры состоит из погрешности контраста и погрешности величины альbedo эталонной поверхности $\Delta_A = \pm 2\%$. При определении альbedo поверхности Венеры предполагается, что альbedo эталонных поверхностей, измеренное на Земле после их пребывания в условиях, имитирующих венерианские, сохраняется таким же в реальных условиях. Отклонения от подобия индикатрис отражения этих поверхностей дадут свой вклад в Δ_A . Погрешность измерения освещенности по телеметрическому каналу АРЧ с учетом всех составляющих $\pm 50\%$, а при определении освещенности поверхности Венеры к ней добавляется переменная погрешность отражательных характеристик.

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАНОРАМЫ, ПЕРЕДАННОЙ С АМС «ВЕНЕРА-10»

Перед изложением результатов обработки каждой панорамы («Венера-10» и «Венера-9») дадим описание характерных для них фотометрических объектов.

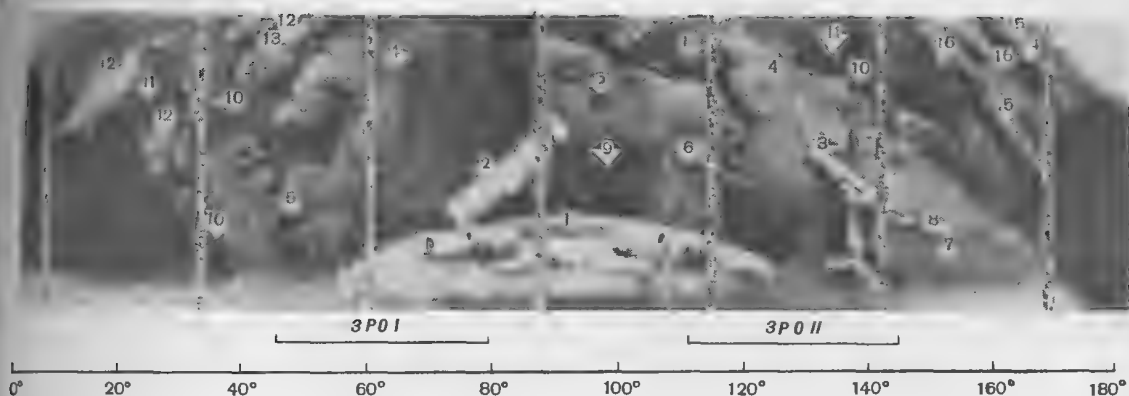
Более качественная телевизионная информация была передана с АМС «Венера-10», поэтому вначале рассмотрим полученную с нее панораму. Она представлена в первоначальном виде на рис. 4. Под панорамой дана угловая привязка кадровой развертки камеры. Там же обозначены зоны работы осветителей (ЗРО). На панораме справа и слева видно яркое небо с расплывчатыми деталями на горизонте. Можно отметить явное посветление поверхности к горизонту. Часть местности и горизонта справа закрыты темным размытым пятном — это нефокусированное изображение крепежного устройства плотномера. В центре панорамы находится край посадочной платформы 1 станции с индикаторной раскраской. Перед платформой лежит теплозащитная крышка 2. Локальное потемнение местности около крышки связано с действием системы АРЧ камеры, заключающемся в понижении чувствительности камеры из-за присутствия в ее поле зрения ярких деталей. Справа от платформы виден плотномер 3 в рабочем положении. Станция находится на большом светлом образовании — плите 4 с темными пятнами 5 и темной протяженной деталью 6, переходящей справа в серый участок 7 с локальным потемнением 8 около плотномера. Серый участок 9 плиты, аналогичный 7, имеется слева от детали 6 на ближнем плане. На нем просматриваются такие же пятна, как 5. Плита окружена темными участками 10, в которые введены более светлые (серые) детали 11. В левой части панорамы видна группа наиболее светлых образований 12. Отметим характерное потем-

Таблица 1. Контрасты деталей на панораме «Венеры-10»

Сравниваемые участки	Контрасты	Максимальная погрешность, %	Сравниваемые участки	Контрасты	Максимальная погрешность, %
4—5	0,4	10	12—13	0,43	6
4—6	0,64	21	14—15	0,37—0,58	20
4—7	0,11—0,16	4,5	14—16	0,35	9,5
4—8	0,32	6,5	1Ч—4	0,15—0,25	4,5
4—9	0,27—0,47	20	1Ч—10	0,4—0,55	20
4—10	0,29—0,5	20	1С—4	0,78—0,8	7
10—11	0,33	9	1С—10	0,84—0,88	21
10—12	0,52—0,7	11			

нение 13 одного из них. В правой части панорамы видна система темных 14, светлых 15 и серых 16 полос.

В табл. 1 представлены контрасты между указанными объектами, причем для каждого из них дана ориентировочная максимальная погрешность. Если один из сравниваемых участков темный, то величина погрешности возрастает. Приведены также контрасты между



Детали, подвергнутые фотометрическим измерениям на панораме «Венера-10» (отмечены номерами)

Рис. 4

характерными участками местности 4 и 10 и эталонными полями 14 и 1С посадочной платформы. Амплитуда сигнала от платформы в пределах каждого поля 14 и 1С постоянна. Этого нельзя сказать о поле 1Б, поэтому оно было исключено из рассмотрения.

Из анализа панорамы, фотоэлектрического сигнала, полученных величин контрастов с привлечением результатов теоретического моделирования условий на поверхности Венеры можно сделать вывод о характере местности в районе посадки станции «Венера-10».

Прежде чем анализировать фотометрические особенности и связанную с ними структуру поверхности, необходимо как-то оговорить ее индикатрису отражения. В [1—3] принималась ортотропная индикатриса отражения. В условиях рассеянного освещения поверхности Венеры угловое распределение яркости какого-либо элемента ее будет приближаться к ортотропному. Если взять крайние варианты индикатрис — зеркалящую или типа лунной, то и тогда будет наблюдаться более или менее равномерное угловое распределение яркости с некоторым максимумом (для горизонтальной площадки он будет направлен в зенит) [5].

Изучение фотоэлектрического сигнала показывает наличие высокочастотной составляющей даже на таких ровных участках, как 10 и левая часть плиты 4, что свидетельствует о большой неровности рельефа. Поэтому из указанных крайних вариантов индикатрис нужно исключить зеркалящую. В случае лунной индикатрисы отражения должно было бы происходить закономерное понижение яркости участков 4 и 10 (их можно принять за горизонтальные) от ближнего плана к дальнему. В пределах точности измерений это не обнаруживается, поэтому индикатрису отражения исследуемой поверхности можно считать достаточно близкой к ортотропной. Этот вывод имеет важное самостоятельное значение. Кроме того, он позволяет более определенно провести анализ структуры поверхности по наблюдаемому распределению яркости.

В соответствии с этим анализом общий характер местности следующий. Станция расположена на светлой плите 4, представляющей собой некоторое возвышение. Она окружена темными пониженными участками поверхности 10. Объяснить потемнение только за счет рельефа не удастся, так как в этом случае по мере продвижения в глубь темной поверхности она должна светлеть. Этого не наблюдается, и, следовательно, потемнение вызвано более темным веществом, находящимся в понижении. Слева видны аналогичные 4 повышения рельефа в виде светлых камней 12, а справа — в виде светлых полос 15, которые разделены в первом случае понижением 10, а во втором — темными полосами 14. В углублениях просматриваются серые детали 11 и 16, промежуточные между светлыми и темными образованиями.

На самой плите 4 можно выделить следующие рельефные образования: 5 — темные углубления небольших размеров; 6 — протяженная впадина, понижения плиты 7 и 9, причем на 9 также есть углубления типа 5; в понижении 7 есть более крутой участок 8. Аналогичный этим понижениям склон 13 есть и на светлом камне в левой части панорамы.

Отмеченное выше осветление к горизонту и расплывчатые детали на горизонте можно объяснить влиянием атмосферы. Детали на горизонте — это, скорее всего, повышения местности, просматриваемые через достаточно толстый слой атмосферы.

Из рассмотрения характера рельефа следует, что определение отражательных характеристик более или менее возможно для ровных светлых частей плиты 4, темного понижения 10 и верхних поверхностей камней 12. Учитывая ортотропность поверхности в месте посадки станции и черных полей посадочной платформы, можно, как указывалось в методике обработки, определить по контрастам между ними (см. табл. 1) альбедо плиты 4 и темного понижения 10. Были найдены следующие величины: $A_4 = 0,05 \div 0,06$ и $A_{10} = 0,03 \div 0,04$. Далее, зная контраст между понижением 10 и верхними поверхностями камней 12 получили альбедо камней $A_{12} = 0,07 \div 0,12$. Такие характеристики — низкое альбедо и ортотропная индикатриса отражения — свойственны многим темным горным породам с неровной поверхностью [6, 7]

Различие в яркости многих деталей имеет рельефное происхождение при постоянном альбедо. Если некоторые из них аппроксимировать ступенчатой схемой [1, 2], схемой треугольной борозды [3] или сферического углубления [3], то становится возможным применение полученных в этих работах теоретических зависимостей для фотометрического определения геометрических параметров схем рельефа, в частности уклонов. При этом нужно использовать результаты, полученные для малых значений альбедо поверхностей. Из рассмотрения панорамы можно заключить, что поверхности плиты 4 и 7, 4 и 8, 4 и 9, поверхности камня 12 и 13 представляют собой ступенчатую схему. Тогда, используя найденные для них контрасты, получим следующие уклоны поверхностей: $\beta_7 = 30 \div 40^\circ$, $\beta_8 \approx 60^\circ$, $\beta_{13} \approx 70^\circ$. Контрасты для поверхностей 4—9 составляют величину $K_{4-9} = 0,27 \div 0,47$, т. е. больше, чем для 4—8. Однако это не говорит о значительно больших уклонах поверхности 9, так как на ней есть темные углубления

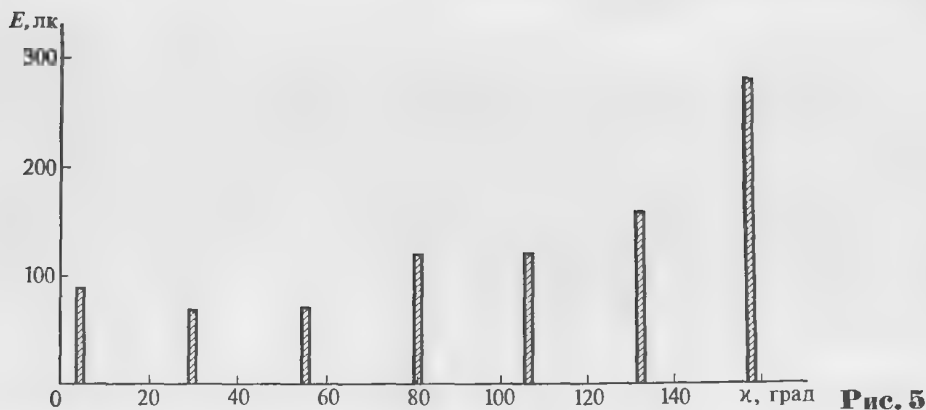


Рис. 5

Распределение освещенности по панораме «Венеры-10»

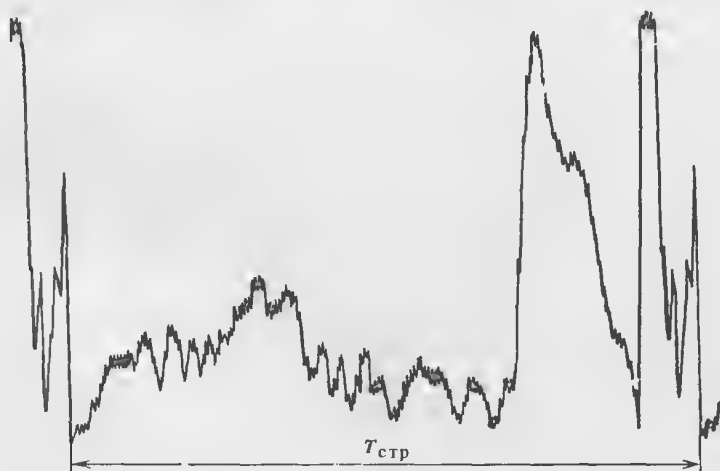


Рис. 6

Осциллограмма видеосигнала, переданного с АМС «Венера-10», в зоне искусственного освещения

типа 5 и может сказываться потемнение вблизи платформы (типа рельефного), за счет чего контрасты возрастают. Менее надежно определение уклонов во впадине 6. Принимая, что она имеет форму борозды, по контрасту 0,64 между поверхностями 4 и 6 получим уклон стенки впадины 55–60°. Совсем затруднено определение параметров углублений 5, так как они имеют неправильную форму.

Перейдем от характеристик поверхности Венеры к условиям ее освещения. Из панорамы следует, что принимавшийся ранее диффузный неизотропный характер освещения поверхности планеты [1–3, 5] не противоречит полученным результатам. Что касается величин

естественной освещенности, то вначале, как указывалось в методике обработки, представим данные по освещенности условной белой поверхности. На рис. 5 изображена угловая диаграмма распределения этой освещенности по панораме на основании данных телеметрических измерений. Максимальная освещенность объясняется попаданием участка неба в поле зрения телевизионной камеры. Изменение освещенности по остальной части панорамы, выходящее за пределы ошибок измерений, нельзя объяснить вариациями альбедо поверхности. Возможны две причины его: 1) локальные потемнения иллюминатора станции; 2) изменения естественной освещенности за время передачи изображения. Первая причина кажется более правдоподобной.

Используя данные по освещенности белой поверхности — ее средняя величина около 150 лк — и по альбедо передаваемых участков поверхности Венеры, можно дать оценку средней естественной освещенности. Она составляет ~ 3000 лк. Заканчивая обработку данной панорамы, необходимо остановиться на зонах работы осветителей. По изображению довольно трудно отметить эти зоны. Этого нельзя сказать о видеосигнале. На рис. 6 представлена осциллограмма видеосигнала, соответствующего центру зоны работы осветителя I. На ней явно видно влияние искусственной подсветки — подъем сигнала в центре светового пятна. То, что оно не так отчетливо на панораме, является следствием довольно высокой естественной освещенности планеты. Увеличение (в большинстве случаев) контрастов, даваемое искусственной подсветкой, в данном случае маскируется высокими контрастами самой поверхности. Так, в зоне работы осветителя II после плотномера темные детали могут быть как истинными, так и порожденными действием подсветки.

ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПАНОРАМЫ, ПЕРЕДАННОЙ С АМС «ВЕНЕРА-9»

Перейдем к анализу панорамы, полученной с АМС «Венера-9» и представленной на рис. 7 без обработки на ЭВМ. Как и для предыдущей панорамы, на рис. 7 дана угловая привязка кадровой развертки камеры и обозначены зоны работы осветителей. Часть панорамы слева с помехами не показана. Аналогично изображению с АМС «Венера-10» на правой стороне видно небо и темное пятно того же происхождения. Здесь также можно отметить увеличение яркости поверхности к горизонту вследствие влияния атмосферы.

В центре расположена посадочная платформа 1 станции, а у ее правого края — плотномер 2. Индикаторная раскраска платформы видна хуже, чем на первой панораме. Амплитуда сигналов от всех полей лежит в области, близкой к уровню белого, и превышает амплитуду сигналов от самых светлых элементов поверхности планеты. Это может быть следствием изменения отражательных характеристик полей (в частности, увеличения альбедо темного поля) или амплитудных характеристик телевизионной системы. Анализ совокупности данных о работе телевизионных систем обеих станций показывает, что первая причина представляется более вероятной.

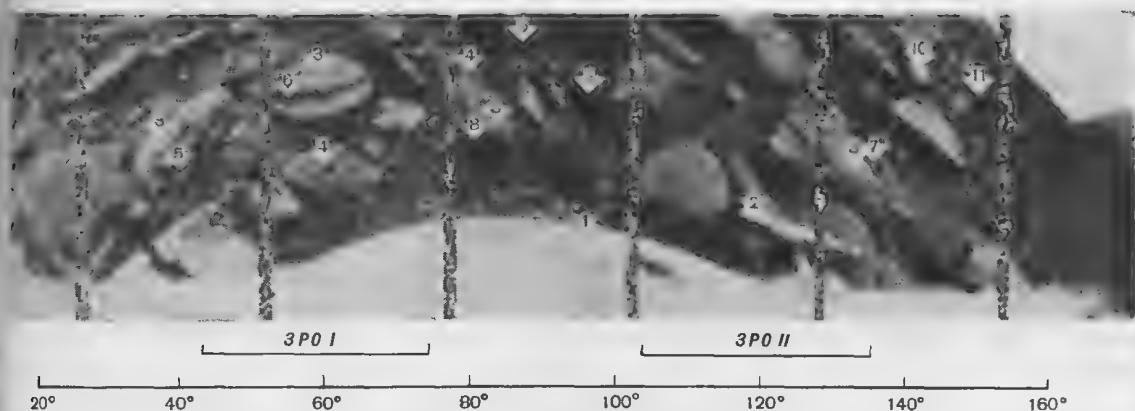


Рис. 7

Детали, подвергнутые фотометрическим измерениям на панораме «Венеры-9» (отмечены номерами)

На поверхности наблюдаются образования, напоминающие по форме и структуре россыпь камней. Отметим характерные фотометрические объекты. Светлые части камней — 3, потемнения на них — 4, темные полосы на двух камнях — 5 и 6, серый участок — 7. Камни разделены темными деталями 8 и серовато-пестрыми участками 9, напоминающими раздробленную основную породу. В правой части панорамы светлые камни и темные промежутки образуют систему светлых (10) и темных (11) полос.

В табл. 2 представлены контрасты между этими объектами и ориентировочные максимальные погрешности определения контраста. Для участков 9 бралась средняя яркость. Колебания между минимальными и максимальными яркостями этих участков дают контраст 0,24—0,43. В силу указанных выше причин измеренные контрасты между эталонными полями платформы отличаются от истинных (полученных на Земле). Поэтому определение отражательных характеристик поверхности планеты по этим полям не очень надежно. Тем не менее такие оценки были сделаны, причем в качестве опорного принималось черное поле. В табл. 2 приведены контрасты между ним и участками панорамы 3, 8, 9.

Таблица 2. Контрасты деталей на панораме «Венеры-9»

Сравниваемые участки	Контрасты	Максимальная погрешность, %	Сравниваемые участки	Контрасты	Максимальная погрешность, %
3—4	0,29—0,37	14	3—9	0,38—0,5	11
3—5	0,84	22	10—11	0,83—0,87	22
3—6	0,82	22	14—3	0,42	4
3—7	0,54	12	14—8	0,92	22
3—8	0,8—0,9	22	14—9	0,68	8

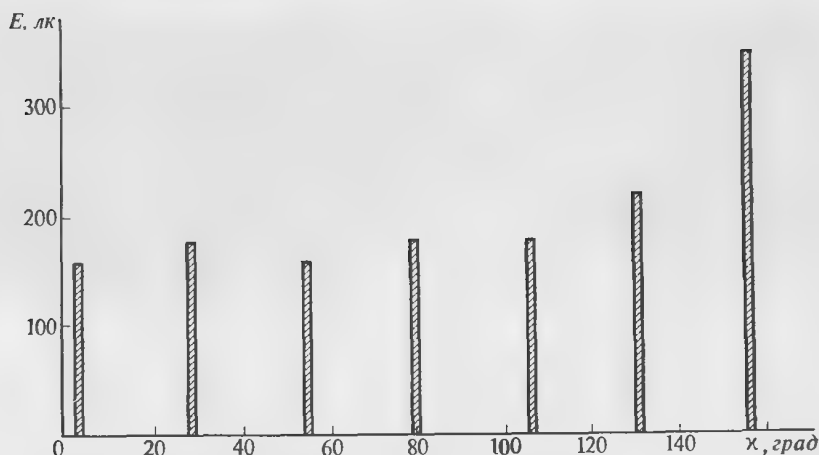


Рис. 8

Распределение освещенности по панораме «Венера-9»

Анализ видеосигнала свидетельствует о том, что поверхность как крупных камней, так и участков между ними очень неровная. Соображения относительно индикатрисы отражения поверхности в районе посадки станции «Венера-10» остаются в силе и для рассматриваемого района. Следовательно, ее можно принять и здесь ортотропной. При исследовании поверхности в месте посадки станции «Венера-9» затруднено использование результатов теоретического моделирования поля яркости для различных форм рельефа, так как отсутствуют однородные образования достаточно правильной формы. Поэтому они используются только для качественного анализа.

Возможна следующая интерпретация наблюдаемого на изображении распределения яркости. Наиболее светлые детали местности на панораме — это верхние поверхности камней. Их можно принять однородными по отражательным характеристикам. Контрасты же на них объясняются имеющимися неровностями. Высокие контрасты между светлыми поверхностями камней 3 и прилегающим к ним темными участками 8 можно объяснить более низкой отражательной способностью прилегающих к камням участков 9 и рельефным фактором. Но, согласно [1, 2], даже если угол между вертикальной поверхностью камня и поверхностью 9 составлял бы 90° , то и тогда контрасты имели бы меньшую величину. Поэтому темные участки 8 следует рассматривать как углубления. Многие из них можно представить в виде трещин между камнями, в частности светлые и темные полосы на правой части панорамы. Высокий контраст между поверхностями камней 3 и темными полосами 5 и 6 указывает на то, что они также являются трещинами в камне. Потемнение 7 вряд ли имеет рельефное происхождение. Его можно рассматривать как результат разрушения камня. Еще более раздробленную структуру имеет поверхность 9. Ее пестрота объясняется сложной структурой. Темные участки на ней представляют собой углубления.

По результатам анализа рельефа можно сделать вывод, что в какой-то мере возможно определение альбеда для ровных верхних частей камней 3 и среднего альбеда поверхности 9. Используя альbedo черного поля посадочной платформы и контрасты между ним и объектами 3 и 9 (см. табл. 2), получили $A_3 = 0,03 \div 0,04$ и $A_9 \approx 0,02$, т. е. величины, примерно в два раза меньшие, чем полученные при обработке предыдущей панорамы. В действительности этой разницы может и не быть ввиду возможного, как было отмечено ранее, изменения в сторону увеличения альбеда темного поля на платформе, к которому привязаны эти измерения.

Перейдем к условиям освещения поверхности планеты в месте посадки станции «Венера-9». На рис. 8 показана угловая диаграмма распределения освещенности условной белой поверхности (по данным телеметрических измерений) в пределах панорамы. Исключая последнее измерение, где часть строки приходится на небосвод, ее средняя величина 180 лк. Из этих данных и оценок альбеда поверхности Венеры в месте посадки, с учетом возможных ошибок его, следует, что освещенность поверхности лежит в пределах 3000—6000 лк. Действие искусственной подсветки на данной панораме практически не выявляется. Причины этого те же, что и на первой панораме. Кроме того, ориентация станции относительно поверхности в данном случае приводит к уменьшению ее освещенности от осветителя.

ВЫВОДЫ

По результатам фотометрической обработки можно сделать следующие основные выводы. Несмотря на разный характер рельефа в местах посадки обеих станций, удаленных друг от друга на расстояние ~2000 км, получены близкие отражательные характеристики поверхности планеты: индикатриса отражения ортотропная, альbedo $0,03 \div 0,12$, которые свойственны темным горным породам с зерновой поверхностью. Для той и другой панорамы характерны высокие контрасты: рельефные — до 0,5; за счет разницы в альбеде — до 0,7; как результат той и другой причин — до 0,9. Оценки освещенности в спектре тарировочного источника излучения дают средний уровень 3000—6000 лк.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панфилов А. С. Расчет оптических характеристик объектов съемки. Пример съемки поверхности Венеры: Препринт ИКИ АН СССР, Д-121. М., 1972.
2. Панфилов А. С. — Космич. исслед., 1975, 13, № 4, 612.
3. Панфилов А. С., Горон А. И. — Космич. исслед., 1976, 14, № 5, 687.
4. Ильясов С. Г., Красников В. В., Фридзон М. Б., Шляхов В. И. — Тр. ЦАО, 1973, № 114.
5. Бирюков Ю. Л., Панфилов А. С., Титарчук Л. Г. — В кн.: Космическая иконо- V
ка. М.: Наука, 1973, с. 106.
6. Narke B., van Horn H. — J. Geophys. Res., 1963, 68, N 15, 4545.
7. Толчельников Ю. С. Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974.

ОБРАБОТКА И ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОСАДОЧНЫХ АППАРАТОВ АМС «ВЕНЕРА-9» И «ВЕНЕРА-10»

* VIII

Обработка телевизионных панорам, выполненная непосредственно после их получения и регистрации на Земле, включала цифровую обработку с целью улучшения качества, фотограмметрическую обработку панорам и топографическую интерпретацию изображений.

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

Цифровая обработка телевизионных панорам поверхности Венеры производилась в Институте проблем передачи информации АН СССР (ИППИ АН СССР) на специализированном вычислительном комплексе цифровой обработки изображений, созданном на основе ЭВМ «Альфа-16». Этот комплекс использовался, в частности, при обработке фототелевизионных снимков, переданных с АМС «Марс-4» и «Марс-5». Математическое обеспечение комплекса создано в ИППИ АН СССР, в его основу легла дисковая диалоговая система [1]. Описание комплекса и его возможностей было приведено в [2]. Этот комплекс был дополнен программами и аппаратными средствами специально для обработки снимков поверхности Венеры. В частности, были существенно усилены средства диалога «человек—машина» и возможности полутонового дисплея.

Полутоновой дисплей представляет собой устройство, обеспечивающее вывод на телевизионный экран полутоновых изображений, содержащих до 32 градаций яркости (рис. 1). Основной частью дисплея является специальная полупроводниковая память, включающая 5 плат, на каждой из которых может храниться один двоичный разряд кода яркости каждого из 256×512 элементов воспроизводимого изображения. Поступающая от ЭВМ информация последовательно записывается в эту память. Запись всего изображения занимает 1 с. При опросе памяти с частотой вещательного телевизионного стандарта данные от плат памяти поступают на преобразователь код-аналог (ПКА), на выходе которого создается многоуровневый аналоговый сигнал. В результате работы специальной формирующей схемы этот сигнал преобразуется в стандартный телевизионный видеосигнал, поступающий на вход телевизионного монитора. В дисплее предусмотрена также так называемая плата наложения, представляющая собой отдельную плату полупроводниковой памяти емкостью 256×512 бит. Поступающие с нее двоичные сигналы логически складываются с сигналами, поступающими с остальных плат. В результате в тех местах изображения, которые соответствуют единицам на плате наложения, высвечиваются белые точки максимальной яркости. Плата наложения может исполь-

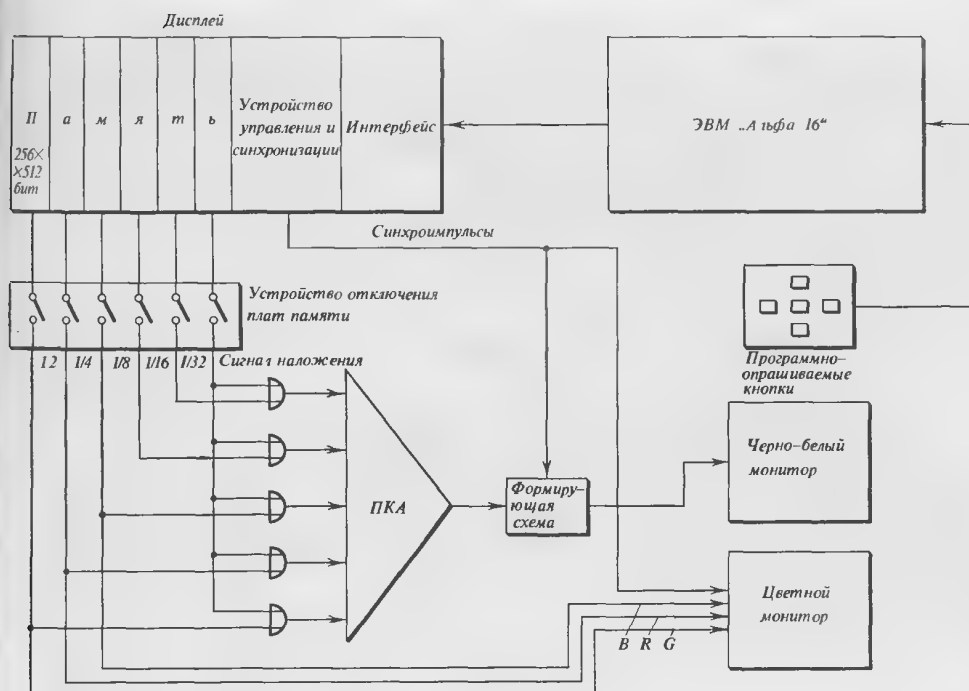


Рис. 1

Блок-схема дисплея

зоваться для вывода на экран различной алфавитно-цифровой и графической информации (графиков, номеров строк, меток и т. п.) на фоне полутонового изображения, хранящегося на остальных платах памяти.

Для организации диалоговой работы с дисплеем был создан ряд специальных устройств. Так, для грубого квантования рассматриваемого изображения, анализа отдельных разрядов кодов яркости его элементов, а также для временного отключения графического выхода в дисплей были встроены шесть переключателей, которые позволяют отключать от ПКА сигналы любых плат памяти дисплея, а также сигналы платы наложения. Сигналы от трех плат памяти дисплея, соответствующих трем старшим разрядам кода яркости, были, кроме того, использованы для создания системы воспроизведения цветного изображения. Для этого сигналы от этих плат через соответствующие блоки формирования подавались на входы *R*, *G* и *B* (соответственно красный, зеленый и синий) цветного телевизионного монитора. Эта система использовалась, в частности, для воспроизведения изображений в псевдоцветах. При этом псевдоцвета соответствовали различным уровням яркости находящегося в памяти дисплея изображения. Такое представление в псевдоцветах облегчает определение границ этих уровней, так как чувствительность зрения к изменениям цвета выше, чем к изменениям яркости.

Для обеспечения указания определенной точки или области в изображении органы управления дисплеем были дополнены пятью крестообразно расположенными управляющими кнопками, состояние которых могло опрашиваться ЭВМ. Благодаря этому оператор мог с помощью специальных программ нажатием кнопок, например, перемещать по экрану крестообразную метку (курсор) или квадратную рамку, координаты которых в каждый момент времени формируются в ЭВМ и отображаются на экране дисплея. Управляющие кнопки нашли также ряд других применений.

Работу с телевизионными панорамами можно условно подразделить на следующие этапы:

- ввод изображений в ЭВМ;
- устранение сбоев синхронизации;
- обработка дефектных строк;
- устранение импульсных помех;
- работа над телеметрическими врезками;
- коррекция эффектов, вызванных работой системы автоматической регулировки яркости (АРЯ);
- препарирование изображений;
- геометрическое трансформирование изображений;
- вывод изображений.

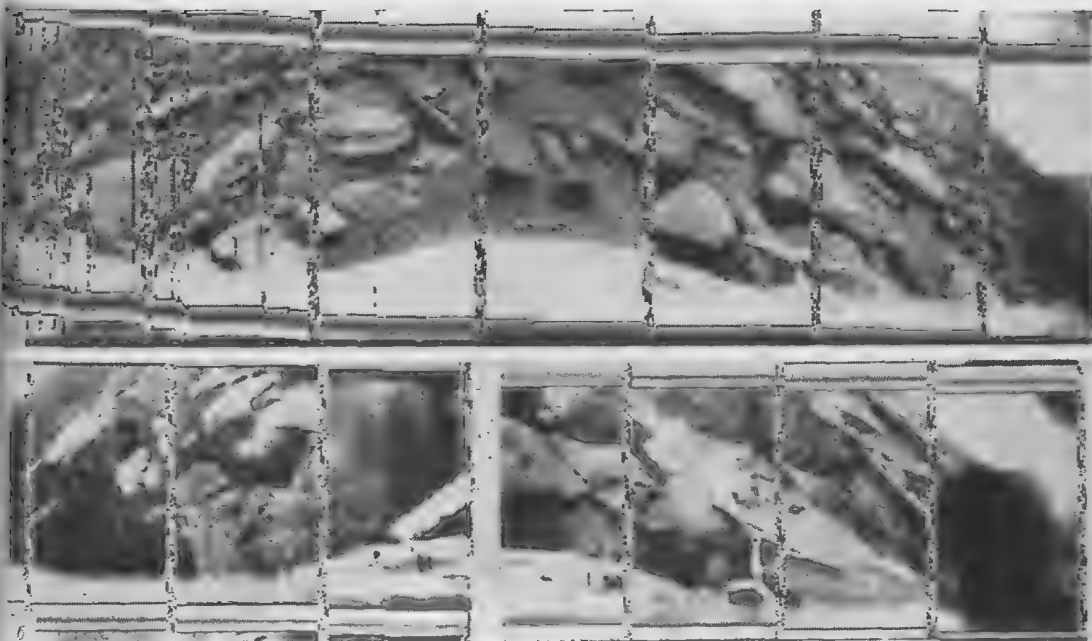
Ниже эта работа описана более подробно.

Ввод изображений в ЭВМ. Передача видеосигнала с посадочных аппаратов АМС «Венера-9» и «Венера-10» выполнялась в цифровой форме. Каждый элемент изображения передавался шестью двоичными разрядами, к которым был добавлен седьмой, контрольный разряд (контроль четности). Эти разряды передавались последовательно, а при приеме видеосигнала на Земле разделялись на семерки разрядов и записывались на цифровой магнитофон. Ввод изображения с цифрового магнитофона в ЭВМ осуществлялся с помощью специального сопрягающего устройства, разработанного в ИППИ АН СССР. Это устройство и соответствующее математическое обеспечение использовались ранее для ввода изображений, переданных АМС «Марс-4» и «Марс-5» [2].

Основной сюжет каждой панорамы поверхности Венеры содержал примерно 128×512 элементов (рис. 2). Поскольку время сеансов связи с каждым из спускаемых аппаратов превышало время передачи панорамы, были получены также изображения панорам при движении сканирующего устройства в обратном направлении (рис. 3). Эта информация также использовалась при обработке.

Устранение сбоев синхронизации. Сбой синхронизации строк заключался в том, что в некоторых строках вместо 128 получалось 129 элементов. Это приводило к смещению начала следующей строки (см. рис. 2).

Устранение сбоев синхронизации производилось в режиме диалога с использованием полутонного дисплея. На экран дисплея выводился участок панорамы в крупном масштабе; оператор, используя управляющие кнопки дисплея, наводил световую метку на выбранную им характерную точку в начале панорамы (реально при синхронизации использовалась граница «черного» и «белого» внутри бланка). Затем метка наводилась на соответствующую точку в первой сбойной строке,



Необработанные панорамы

а — «Венера-9», б — «Венера-10»

Рис. 2

потом на следующую и т. д. Программа сама «подставляла» нужные участки изображения, с тем чтобы минимизировать расстояние, на которое нужно двигать метку.

Как и при любой диалоговой работе, машина составляла на телегайке протокол действий оператора; в данном случае печатались номера сбойных строк и величины сдвигов. Такие протоколы впоследствии могут быть использованы для анализа обработки изображений или в случае, если необходимо повторить какую-то часть работы.

Обработка дефектных строк. Отдельные строки в начале панорамы, полученной с «Венеры-9», были приняты полностью или частично неверно: содержащаяся в них информация по структуре была схожа с информацией на телеметрических врезках (см. рис. 2, а). Поскольку в элементах этих строк оказалось много ошибок четности, можно было предположить, что произошло неверное разбиение последовательного кода на семерки разрядов. Эта гипотеза оказалась верной для большинства таких строк, причем имели место сдвиги как на один, так и на большее число разрядов.

Причиной появления таких сбоях служило пропадание или появление лишнего бита информации при передаче изображения последовательным кодом. Специальная схема синхронизации при формировании бланка ограничивала влияние этого явления на другие строки.

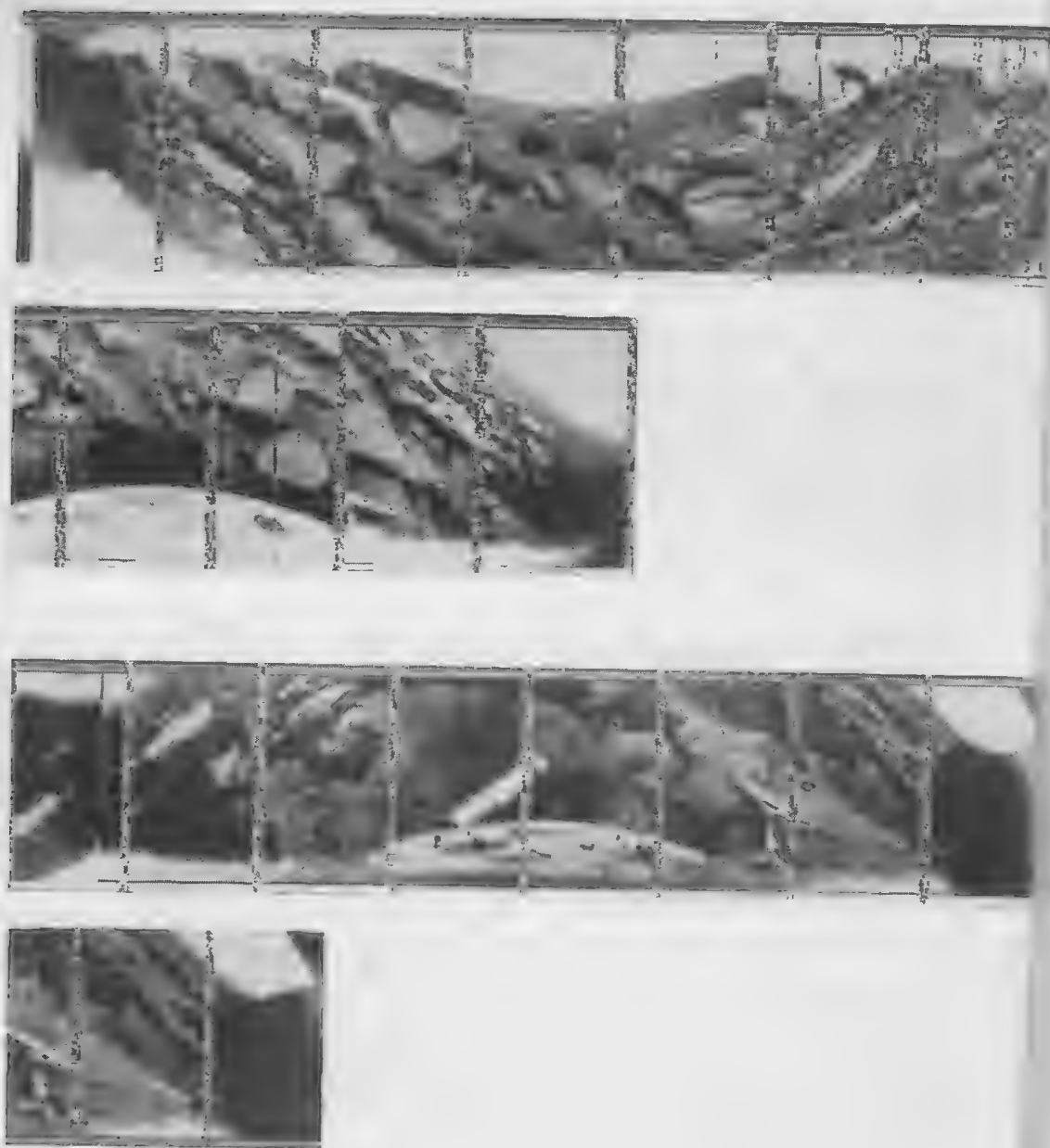


Рис. 3

Панорамы после устранения сбоях синхронизации

Под каждой панорамой участки, переданные во время обратного хода

Устранение сбоев строк производилось также в режиме диалога «человек — машина». При этом на экран полутонового дисплея выводился фрагмент изображения и пара световых меток в одной строке (на экране дисплея строки были расположены горизонтально).

С помощью четырех управляющих кнопок дисплея метки можно было передвигать вместе вверх или вниз или двигать любую из них вправо или влево. Участок строки между этими двумя метками рассматривался как последовательность двоичных разрядов (по аналогии с последовательным кодом при передаче) и сдвигался на один разряд. Результаты этого сдвига отображались на экране дисплея. Затем световые метки устанавливались на концы дефектного участка и с помощью отдельного ключа на пульте ЭВМ устанавливались 0 или 1 в старшем разряде первого элемента участка (этот разряд устанавливается в соответствии с изображением на дисплее). После этого нажатием пятой кнопки исправленный участок записывался в основную память ЭВМ, и начиналась обработка следующего участка.

Описанная процедура позволила устранить более половины сбоев строк. Но в ряде случаев восстанавливалась только часть дефектного участка строки. Тогда процедура повторялась для оставшейся части строки.

Если в результате семикратного повторения изображение не восстанавливалось, то можно было заключить, что причина сбоя в строке носит иной характер.

Для устранения сбоя некоторых строк применялись две модификации этой программы: участок сдвигался либо на бит вправо, либо на бит влево. Основанием для использования той или иной модификации служил тщательный анализ цифровых распечаток изображений. Заметим, что ошибка в определении направления сдвига может привести к сдвигу только на один элемент.

Результаты восстановления дефектных строк можно видеть при сравнении рис. 2 и 4. Некоторые ошибки, возникающие на концах дефектных участков из-за неверной установки старшего разряда, были устранены впоследствии при устранении импульсных помех. Анализ показал, что на восстановленных строках выполняется контроль четности, что является дополнительным доказательством верного восстановления.

На одной из строк кроме сдвига последовательного кода произошла также инверсия (т. е. появилось негативное изображение). Этот эффект объясняется техническими причинами, связанными с особенностями передачи последовательного кода.

Часть сбоев (см. рис. 4, а) устранить описанными методами не удалось. Более подробный анализ показал, что эти участки содержат вместо видеoinформации телеметрическую информацию, аналогичную информации на врезках. Такие участки были заменены соответствующими участками соседних строк (см. рис. 5, а).

Устранение импульсных помех. Телевизионные панорамы поверхности Венеры содержали незначительное число импульсных помех — несколько десятков на панораме «Венеры-9» и всего несколько штук на панораме «Венеры-10». Почти все эти помехи были вызваны сбоем одного двоичного разряда в коде яркости. Благодаря наличию контроль-

ного разряда такие сбои было легко обнаружить, так как при сбое одного разряда нарушается четность. Как правило, удалось верпо определить и восстановить неверный разряд, тем самым восстановив потерянную из-за помехи информацию.

Анализ и устранение импульсных помех происходили в режиме диалога. При этом на полутоновой дисплей выводился в крупном масштабе квадратный фрагмент изображения размером 128×128 элементов с размером одного элемента 2×2 мм. Элементы с неверной четностью закрашивались ярко-белым (на плате наложения). Нажимая ключ, отключающий плату наложения, можно было произвести визуальный анализ того или иного сбоя. С помощью управляющих кнопок дисплея на нужный элемент наводилась световая метка, после чего содержимое данного и восьми соседних элементов распечатывалось на телетайпе в виде матрицы 3×3 , причем элементы с нарушенной четностью отмечались звездочкой. Печатались также координаты элемента.

По всем этим данным оператор принимал решение и печатал ответ (т. е. исправленное значение кода яркости) на телетайпе; причем результат исправления можно было сразу видеть на экране. На восстановление одного элемента изображения уходило меньше минуты. Результаты устранения импульсных помех можно видеть, сравнивая рис. 4 и 5.

Описанный метод позволил также дополнительно проконтролировать результаты восстановления дефектных строк на панораме «Венеры-9» (так как при верном восстановлении последовательного кода должна восстановиться и четкость элементов) и исправить ошибки, которые возникли на краях дефектных участков.

Работа над телеметрическими врезками. На основной части панорамы «Венеры-9» имелось шесть телеметрических врезок, на основной части панорамы «Венеры-10» — восемь. Недостающую в них видеoinформацию можно было восстановить для четырех врезок каждой панорамы, так как соответствующие участки изображений поверхности можно было взять из частей панорам, полученных при обратном ходе сканера. Однако результат прямого замещения, который можно видеть на рис. 4, явно неудовлетворителен. Сильное расхождение яркостей объясняется работой системы автоматической регулировки яркости, которая работает по-разному на основной панораме и панораме обратного хода, так как развертка изображения производилась на них в противоположные стороны. Поэтому понадобилось дополнительно подстраивать яркость изображений на местах вставок.

Для этой цели использовалась программа, позволяющая изменять величину видеосигнала путем умножения ее на линейную функцию

$$f(y) = ky + b$$

или сложения ее с линейной функцией. Здесь y — координата изображения, отсчитываемая вдоль строки, k и b — коэффициенты, определяемые в режиме диалога.

Для определения коэффициентов на экран дисплея выводился в увеличенном масштабе участок изображения.

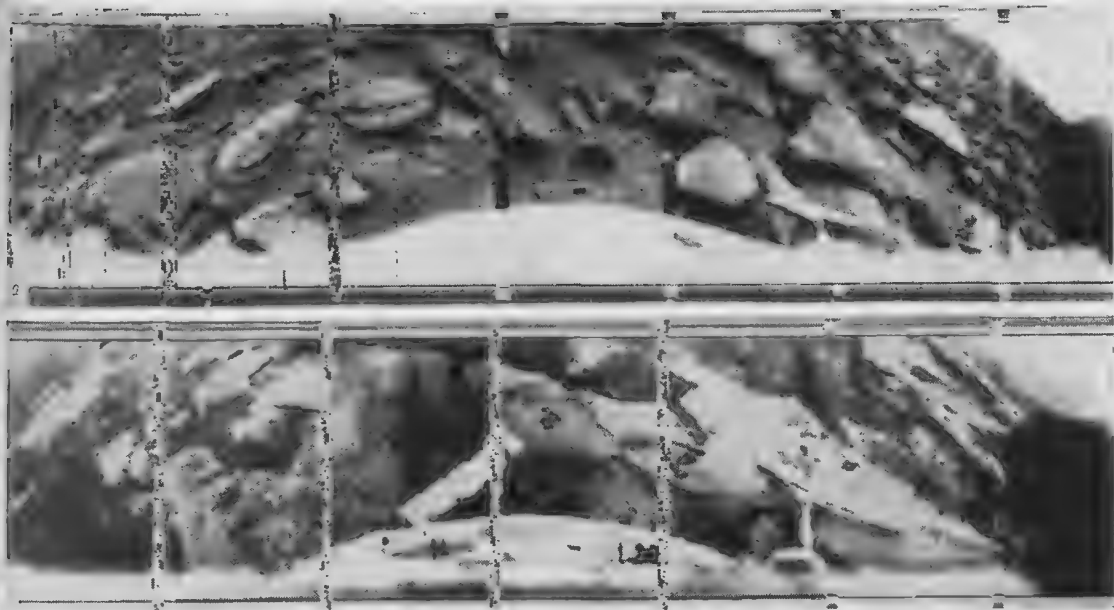


Рис. 4



Рис. 5

Панорамы после устранения дефектов последовательного кода

Врезки восполнены за счет панорам обратного хода «Венеры-9» (а) и «Венеры-10» (б)

Панорамы «Венеры-9» (а) и «Венеры-10» (б) после устранения импульсных помех, выравнивания вставок на врезках

Невосполненные врезки заменены нейтральным фоном

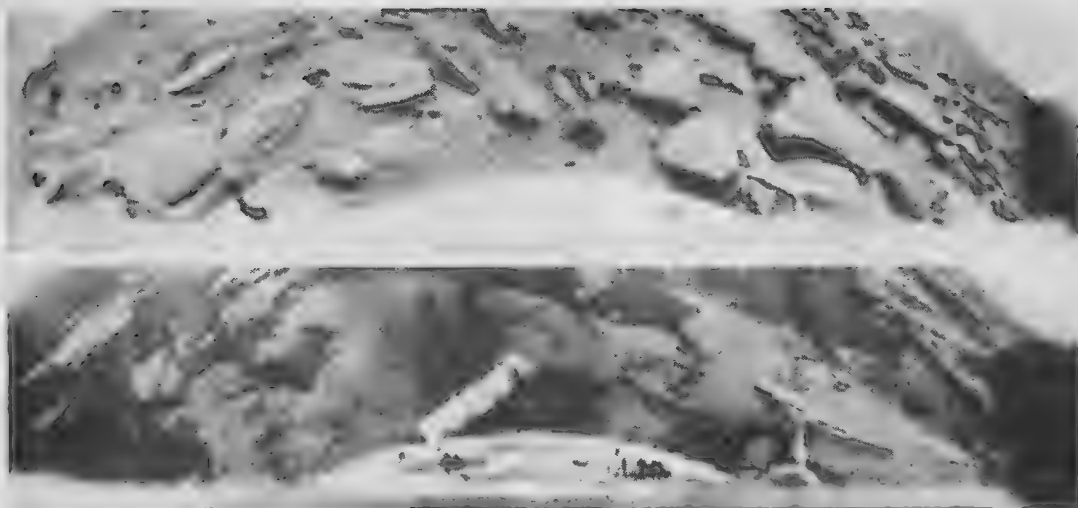


Рис. 6 Панорамы «Венеры-9» (а) и «Венеры-10» (б) после интерполяции невосполненных врезок

С помощью управляющих кнопок дисплея можно было плавно менять значения коэффициентов k и b с тем, чтобы подобрать нужную коррекцию изображения, причем исходные значения принимались равными 0 и 1 в случае умножения и 0 и 0 в случае сложения, т. е. вначале сохранялось исходное изображение.

Критерием правильности коррекции служило пропадание видимых границ между вставкой и основным изображением.

Как правило, каждая вставка разбивалась по длине (вдоль строк) на 3—4 участка шириной во всю вставку. На некоторых участках использовался вариант со сложением, чаще — вариант с умножением и иногда их комбинация. Лишь в одном случае, на врезке панорамы «Венеры-9», пришлось использовать более узкие участки, так как именно на врезку приходился конец большого камня и не удалось подобрать корректирующую функцию, общую по всей ширине вставки.

Остальные шесть врезок (две на первой и четыре на второй панораме) были в одном варианте заменены средним уровнем яркости со слабой периодической структурой (рис. 5), а в другом была произведена линейная интерполяция по краям врезок (рис. 6), причем направление интерполяции выбиралось отдельно для каждой врезки, с тем чтобы проинтерполированная врезка возможно меньше выделялась на фоне изображения. Следует отметить, что в последнем случае на месте врезок не содержится объективной информации о поверхности Венеры.

Коррекция эффектов, вызванных работой системы автоматической регулировки яркости (АРЯ). На панораме «Венеры-10» видны черные полосы против белых частей изображения (защитного кожуха телефо-



Частичная коррекция схемы АРЯ по участку панорамы «Венеры-10» (а) и соответствующий участок нескорректированного изображения (б)

Рис. 7

тометра), вызванные работой АРЯ. Для того чтобы улучшить визуальное качество этой части панорамы, была произведена частичная коррекция работы АРЯ. Результаты можно видеть в верхней части рис. 7. Соответствующий участок некорректированного изображения показан внизу.

Для коррекции была подобрана функция, которая вычиталась из изображения, подвергнутого предварительно нелинейному преобразо-



Рис. 8 Вариант коррекции за АРЯ («Венера-10»)

ванию. Функция была постоянной по каждой строке, т. е. зависела только от номера строки. Нелинейное преобразование понадобилось, чтобы скорректировать нелинейность работы в области черного.

Кроме того, был испробован и другой вариант коррекции работы АРЯ, вытекающий из гипотезы, что черные затяжки от белых участков изображения аддитивно складываются с неискаженным видеосигналом и что эта аддитивная помеха есть результат интегрирования видеосигнала по некоторой окрестности вдоль строк развертки. В этом варианте значения видеосигнала на наиболее ярких участках изображения, превышающие некоторый задаваемый оператором на основании визуального анализа изображения порог, заменялись этим пороговым значением, после чего производилось выравнивание средних яркости изображения по окрестности в 40 элементов вдоль строк. Затем исправленные яркие участки восстанавливались путем добавления к выравненному видеосигналу положительных значений разностей между исходным видеосигналом и порогом, которые перед выравниванием запоминались.

Такая сравнительно простая операция, не учитывающая возможного изменения коэффициента передачи контрастов системы в результате действия АРЯ, позволила получить скорректированное изображение (рис. 8), пригодное для дальнейшей обработки с помощью алгоритма эквализации, который доводит контрасты до максимально возможных независимо от их первоначальной величины.

Следует иметь в виду, что при коррекции работы АРЯ не использовалась априорная информация о ее работе. В частности, использование корректирующей функции, постоянной по каждой строке, является весьма приближенным. Поэтому необходимо соблюдать известную осторожность при интерпретации данного результата.

Препарирование изображений. Для облегчения визуальной интерпретации панорам производилось повышение локальных контрастов, выделение границ и оконтуривание изображений. Для повышения локальных контрастов использовался алгоритм скользящей эквализации гистограммы распределения яркостей, описанный ранее [3]. Эквализация гистограммы представляет собой нелинейное преобразование сиг-

нала, которое переводит гистограмму распределения его значений в равномерную (используется дискретный аналог такого преобразования). Таблица такого преобразования строится следующим образом. Пусть $h(i)$ — гистограмма значений видеосигнала, измеренная для некоторого участка изображения, включающего преобразуемые элементы, i — номер уровня квантования ($i = 0, 1, \dots, N-1$), A — исходное значение видеосигнала. Тогда его преобразованные значения B определяются выражением

$$B = (N-1) \sum_{i=0}^A h(i). \quad (1)$$

Эквализацию можно производить по всему изображению или пофрагментно, причем фрагменты изображения могут перекрываться. При пофрагментной эквализации с перекрытием гистограмма распределения строится по всему фрагменту, а преобразуется только его центральная часть с размерами, равными размерам неперекрывающихся участков. Если каждый следующий фрагмент сдвигается относительно предыдущего на один элемент, то преобразование называется скользящим. Таблица скользящего преобразования — эквализации — меняется от элемента к элементу изображения в соответствии с изменениями гистограммы окружающих эти элементы фрагментов изображения.

Смысл применения процедуры эквализации в том, что она приводит к увеличению контрастов на участках изображения с наиболее часто встречающимися значениями видеосигнала. Это можно пояснить с помощью рисунков. На рис. 9 показана некоторая гипотетическая двухмодовая гистограмма (1). Такая гистограмма характерна для изображений, на которых имеются выраженные области света и тени с малоконтрастными деталями. На том же рис. 9 показана накопленная гистограмма (2). Как следует из (1), она является (в соответствующем масштабе по вертикали) графиком функции преобразования видеосигнала. Там, где гистограмма имела максимумы, крутизна преобразования выше, т. е. степень усиления контрастов больше. Такое преоб-

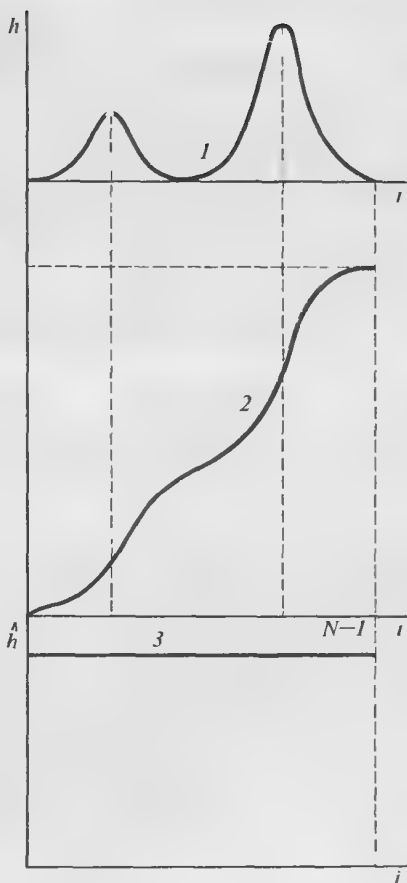


Рис. 9

К объяснению эквализации

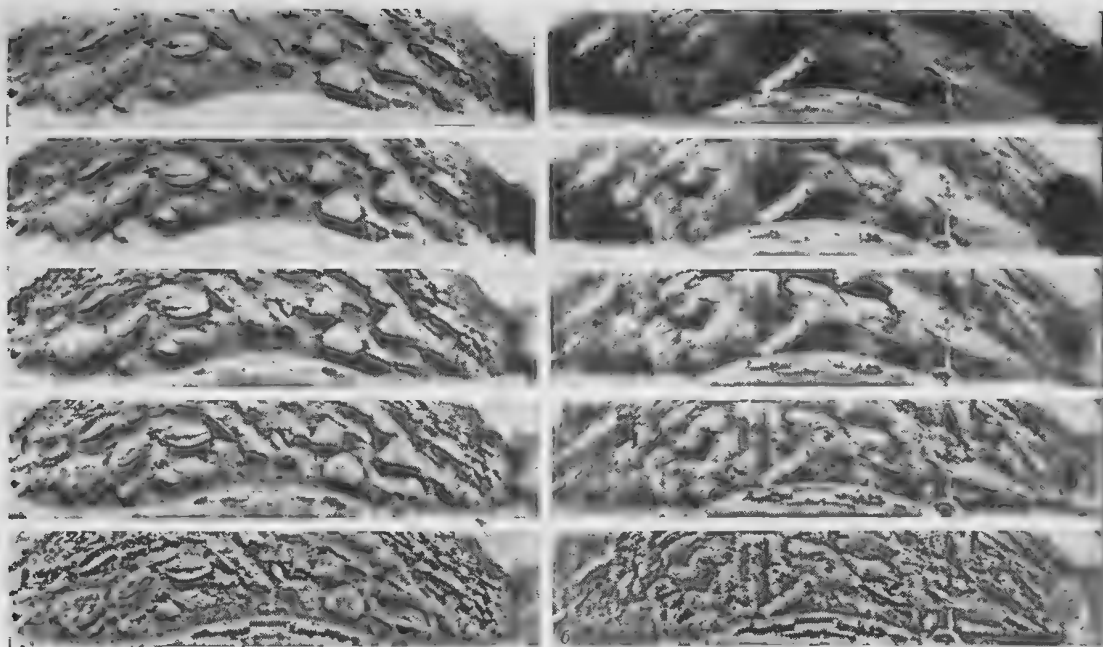


Рис. 10 Эквализованные изображения

Сверху вниз: исходное изображение, результаты эквализации по всему изображению, результаты локальной эквализации с размерами окрестности 65×65 , 33×33 , 17×17 элементов; а — «Венера-9», б — «Венера-10»

разование дает видеосигнал с равномерной гистограммой распределения (линия 3). На преобразованном изображении уже нет преобладающих областей света и тени, а контраст деталей в прежних светлых и темных областях возрос.

При обработке телевизионных панорам поверхности Венеры был использован метод скользящей эквализации, при котором для каждого элемента изображения по некоторой его окрестности строилась гистограмма распределения яркости, и по этой гистограмме определялось новое значение яркости только этого элемента.

Для ускорения работы гистограмма окрестности каждого следующего элемента пересчитывалась с использованием гистограммы окрестности предыдущего элемента [4].

Результаты повышения локальных контрастов можно видеть на рис. 10. На рис. 11 показан вариант эквализации панорамы «Венеры-10», выполненной по окрестности 20×20 элементов с шагом 5×5 элементов.

Выделение границ деталей изображения проводилось двояко: путем вычисления модуля градиента видеосигнала и модуля лапласиана (точнее, их дискретных аналогов). Оконтурирование производилось добавлением усиленного в определенное число раз значений модуля градиента или лапласиана к исходному видеосигналу. Результаты таких преобразований иллюстрируются рис. 12.



Рис. 11



Рис. 12

Вариант эквализованного изображения с дискретным шагом («Венера-10»)

Определение границ и оконтуривание изображения

а — модуль градиента, *б* — исходное изображение плюс модуль градиента, *в* — модуль лапласиана, *г* — исходное изображение плюс модуль лапласиана

Геометрическое трансформирование изображения выполнялось в соответствии с уравнениями связи координат точек местности и их изображений на телевизионных панорамах, которые приводятся в последующих разделах данной главы, с использованием алгоритмов, описанных в [4].

Вывод изображений. Изображения выводились на фотопленку с использованием соответствующего устройства вывода. В нескольких случаях (см. рис. 5, 6) количество элементов было увеличено в 16 раз (в 4 раза по каждой оси) путем билинейной интерполяции. Этот метод не повышает четкости, а всего лишь устраняет неприятные эффекты, связанные с большими размерами квадратных элементов раstra.

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ

Фотограмметрическая обработка телевизионных панорам, полученных со станций «Венера-9» и «Венера-10», выполнялась с целью изучения взаимного положения на них элементов топографической ситуации: камней и выходов коренных пород, а также размеров и форм этих образований. Для этого необходимо построить топографические схемы поверхности в месте посадки станции.

Топографическую схему по одиночным телевизионным панорамам можно построить только приняв какую-либо исходную гипотезу о характере рельефа этой поверхности. Принятая гипотеза должна давать возможность записать уравнение поверхности в зоне съемки.

Для случая съемки со станций «Венера-9» и «Венера-10» в качестве поверхности, аппроксимирующей снятую на панорамах, принималась плоскость, проходящая через посадочное кольцо станции.

Основанием для принятия такой гипотезы служат следующие обстоятельства: во-первых, ровная, с точностью до нескольких градусов, одинаково наклоненная по отношению к строкам панорамы линия видимого горизонта на каждом краю как первой, так и второй панорамы; во-вторых, параллельность дальних границ камней и выходов коренных пород линии горизонта на обеих панорамах; в-третьих, практически равномерное на обеих панорамах уменьшение видимых размеров мелких деталей по мере приближения к линии горизонта.

Указанную выше плоскость целесообразно выбирать так, чтобы нормаль к ней определялась из условия минимума суммы квадратов случайных отклонений вертикальных углов сканирующих лучей действительного горизонта от вертикальных углов направлений на точки математического горизонта, лежащих в тех же вертикальных плоскостях, что и сканирующие лучи. При изучении особенностей венерианской поверхности с помощью топографической схемы полезно использовать также ее изображение, близкое по восприятию к центральной проекции. Таким изображением может быть панорама с вертикальной осью панорамирования. Поэтому в число задач по фотограмметрической обработке телевизионных панорам наряду с построением топографических схем было включено также их трансформирование в панорамные изображения с вертикальной осью панорамирования.

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТРАНСФОРМИРОВАНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ПАНОРАМ

Построение топографического плана участков венерианской поверхности, изобразившихся на каждой телевизионной панораме, может быть выполнено в местной топоцентрической системе координат $S'X_T Y_T Z_T$ с осями i_T, j_T, k_T . Координатная плоскость $S'X_T Y_T$ этой системы совмещалась с плоскостью, аппроксимирующей на участке съемки поверхность планеты. Начало S' системы координат $S'X_T Y_T Z_T$ совмещалось с проекцией на плоскость $S'X_T Y_T$ начала S системы координат $Sxyz$ (i, j, k) панорамной телевизионной камеры.

Координатная плоскость $S'X_T Z_T$ была выбрана таким образом, чтобы она содержала нормаль к плоскости $S'X_T Y_T$ и ось аппликата Sz системы координат $Sxyz$ камеры. Ось аппликата $S'Z_T$ совмещалась с этой нормалью. Ось абсцисс $S'X_T$ совмещалась с проекцией оси Sz на плоскость $S'X_T Y_T$, а ось ординат $S'Y_T$ выбиралась по правилу правой связки.

Система координат $Sxyz$ панорамной телевизионной камеры выбиралась следующим образом. Начало S этой системы помещалось в переднюю узловую точку объектива камеры. Ось абсцисс Sx совмещалась с плоскостью, содержащей оптическую ось камеры и нормаль к плоскости сканирующего зеркала на момент построения изображения в середине средней строки панорамы. Положительное направление оси абсцисс Sx выбиралось в сторону отраженного от зеркала в этот момент сканирующего луча. Ось ординат Sy выбиралась так, чтобы система координат $Sxyz$ была правой.

Направляющие косинусы сканирующего луча l', m', n' до сканирующего зеркала в системе координат $Sxyz$ равны по определению самой системы

$$l' = 0; \quad m' = 0; \quad n' = 1. \quad (1)$$

Направляющие косинусы сканирующего луча, отраженного от зеркала, обозначим через l, m, n . Выразим их через два направляющих угла: угол панорамирования α и угол сканирования β . Эти углы условным образом выбирать так, чтобы

$$l = \cos \alpha \cos \beta; \quad m = -\sin \alpha \cos \beta; \quad n = \sin \beta. \quad (2)$$

Таким образом, угол панорамирования α определим как угол между плоскостью Sxz и плоскостью, содержащей оптическую ось камеры и сканирующий луч (эту плоскость назовем сканирующей). Отсчитывать угол панорамирования будем от плоскости Sxz вокруг оптической оси по часовой стрелке до сканирующей плоскости. Угол сканирования β определим как угол между сканирующим лучом и плоскостью Sxy . Если сканирующий луч направлен в сторону положительной полуоси аппликата Sz , то угол β будет положительным.

Изображение, снятое с помощью панорамной телевизионной камеры, регистрировалось на Земле с помощью устройств, которые обеспечивают достаточно высокую геометрическую точность синтеза изображения. Построение фотографического изображения осуществляется с помощью барабанной развертки. При этом экспонирование пленки

производится световым пятном, которое фокусируется на поверхность пленки объективом регистрирующей аппаратуры и модулируется принятым на Земле видеосигналом изображения. При правильной синхронизации работы панорамной телевизионной камеры и регистрирующей аппаратуры одна строка изображения соответствует одному повороту сканирующего зеркала.

Кадровая развертка изображения по углу панорамирования осуществляется перемещением светового пятна параллельно оси вращения барабана.

При крайних положениях сканирующего зеркала в видеосигнал изображения замешивается сигнал электрического бланка. Этот бланк при фотографической регистрации изображения образует верхнюю и нижнюю границы панорамы.

Непосредственным объектом фотограмметрических измерений являются координаты точек изображений на телевизионных панорамах в системе координат oxy . Начало o этой системы совместим с началом средней строки изображения. Ось абсцис ox системы совместим с границей изображения, образованной электрическим бланком панорамы. Ординаты изображения будем отсчитывать вдоль строк изображения. Свяжем углы панорамирования и сканирования с координатами точек изображения следующими соотношениями:

$$\alpha = k_{\alpha}x + \Delta\alpha; \quad \beta = \beta_0 + k_{\beta}y + \Delta\beta, \quad (3)$$

где k_{α} , k_{β} — угловые масштабные коэффициенты панорамирования и $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ — составляющие фотограмметрической дисторсии в углах панорамирования и сканирования.

Если обозначить через $\mathbf{r}(l, m, n)$ и $\mathbf{r}_T(l_T, m_T, n_T)$ единичные векторы сканирующего луча в системах $Sxyz$ и $S'X_TY_TZ_T$, то можно записать

$$\mathbf{r} = A\mathbf{r}_T, \quad (4)$$

где A — матрица ориентации системы $Sxyz$ относительно системы $S'X_TY_TZ_T$. Получим выражения для определения элементов матрицы A .

Если известны составляющие единичного вектора $\mathbf{r}$ нормали (l_n, m_n, n_n) в системе координат $Sxyz$ камеры, то $a_{13} = l_n$, $a_{23} = m_n$, $a_{33} = n_n$.

Составляющие орта $\mathbf{j}_T$ в системе $Sxyz$ определяются как составляющие векторного произведения

$$\mathbf{j}_T = \frac{\mathbf{r}_n \times \mathbf{k}}{|\mathbf{r}_n \times \mathbf{k}|},$$

$$\text{т. е.} \quad a_{12} = \frac{m_n}{\sqrt{1-n_n^2}}; \quad a_{22} = \frac{l_n}{\sqrt{1-n_n^2}}; \quad a_{32} = 0. \quad (5)$$

Направляющие косинусы a_{11} , a_{21} , a_{31} определяются так:

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{22}a_{23} - a_{23}a_{32}; \\ a_{21} &= -(a_{12}a_{33} - a_{32}a_{13}); \\ a_{31} &= a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}. \end{aligned} \quad (6)$$

Направляющие косинусы l_T, m_T, n_T сканирующего луча в системе координат $S'X_TY_TZ_T$ определяются так:

$$l_T = \frac{X_T - X_{TS}}{D}; \quad m_T = \frac{Y_T - Y_{TS}}{D}; \quad n_T = \frac{Z_T - Z_{TS}}{D}; \quad (7)$$

$$D = \sqrt{(X_T - X_{TS})^2 + (Y_T - Y_{TS})^2 + (Z_T - Z_{TS})^2},$$

где X_{TS}, Y_{TS}, Z_{TS} — координаты начала S системы $Sxyz$ в топоцентрической системе $S'X_TY_TZ_T$. Отсюда, принимая во внимание соотношения (2)–(4), получим с учетом того, что по определению системы $S'X_TY_TZ_T$

$$X_{TS} = 0 \quad \text{и} \quad Y_{TS} = 0,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{a_{21}X_T + a_{22}Y_T + a_{23}(Z_T - Z_{TS})}{a_{11}X_T + a_{12}Y_T + a_{13}(Z_T - Z_{TS})}, \quad (8)$$

$$\sin \beta = \frac{1}{D} [a_{31}X_T + a_{32}Y_T + a_{33}(Z_T - Z_{TS})];$$

$$X_T = (Z_T - Z_{TS}) \frac{a_{11}l + a_{21}m + a_{31}n}{a_{13}l + a_{23}m + a_{33}n}, \quad (9)$$

$$Y_T = (Z_T - Z_{TS}) \frac{a_{21}l + a_{22}m + a_{32}n}{a_{13}l + a_{23}m + a_{33}n}.$$

Эти соотношения являются исходными для трансформирования изображения поверхности из проекции телевизионной панорамы в ее ортогональную проекцию — топографический план.

Трансформирование изображения телевизионной панорамы, полученной при наклонной оптической оси объектива панорамной телевизионной камеры, в изображение с вертикальной оптической осью выполняется с помощью соотношений

$$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[- \frac{a_{21}l + a_{22}m + a_{23}n}{a_{11}l + a_{12}m + a_{13}n} \right], \quad (10)$$

$$\beta = \operatorname{arc} \sin (a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n);$$

$$\alpha = \frac{1}{k_\alpha} \left\{ \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[- \frac{a_{21}l^0 + a_{22}m^0 + a_{23}n^0}{a_{11}l^0 + a_{12}m^0 + a_{13}n^0} - \Delta\alpha \right] \right\}, \quad (11)$$

$$\beta = \frac{1}{k_\beta} [\operatorname{arc} \sin (a_{31}l^0 + a_{32}m^0 + a_{33}n^0) - \beta_0 - \Delta\beta];$$

$$l^0 = \cos \alpha^0 \cos \beta^0, \quad m^0 = -\sin \alpha^0 \cos \beta^0, \quad n^0 = \sin \beta^0, \quad (12)$$

где α^0, β^0 — направляющие углы сканирующего луча при вертикальной установке камеры.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ

Для того чтобы найти направляющие косинусы l_n, m_n, n_n , определяющие в соответствии с соотношениями (5) и (6) элементы матрицы ориентации A , воспользуемся изображением на телевизионной панораме линии видимого горизонта.

Угол η между сканирующим лучом и нормалью к поверхности планеты равен

$$\eta_i = \arccos (l_i l_n + m_i m_n + n_i n_n), \quad (13)$$

где l_i, m_i, n_i — направляющие косинусы сканирующего луча i -й точки на горизонте.

В том случае, когда действительный горизонт отличается от математического из-за рельефа реальной поверхности и проектирующихся на горизонт элементов топографической ситуации, угол отличается от идеального, т. е.

$$\eta_i = 90^\circ + \Delta\eta_i,$$

и потому, учитывая, что величина отклонения $\Delta\eta_i$ малая, получим

$$l_i l_n + m_i m_n + n_i n_n = -\Delta\eta_i. \quad (14)$$

Выбрав три точки на линии видимого горизонта и измерив их координаты, получим, не учитывая величины $\Delta\eta$, соотношения

$$\begin{aligned} l_1 l_n + m_1 m_n + n_1 n_n &= 0, \\ l_2 l_n + m_2 m_n + n_2 n_n &= 0, \\ l_3 l_n + m_3 m_n + n_3 n_n &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

отсюда

$$\begin{aligned} (l_2 - l_1)u + (m_2 - m_1)w + (n_2 - n_1) &= 0, \\ (l_3 - l_1)u + (m_3 - m_1)w + (n_3 - n_1) &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где $u = l_n/n_n$; $w = m_n/n_n$.

Выражения для u и w найдем из (16):

$$\begin{aligned} u &= \frac{(n_3 - n_1)(m_2 - m_1) - (n_2 - n_1)(m_3 - m_1)}{(l_2 - l_1)(m_3 - m_1) - (l_3 - l_1)(m_2 - m_1)}, \\ w &= \frac{(n_2 - n_1)(l_3 - l_1) - (n_3 - n_1)(l_2 - l_1)}{(l_2 - l_1)(m_3 - m_1) - (l_3 - l_1)(m_2 - m_1)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Направляющие косинусы нормали определяются так:

$$\begin{aligned} l_n &= \frac{u}{\sqrt{1 + (u^2 + w^2)}}, & m_n &= \frac{w}{\sqrt{1 + (u^2 + w^2)}}, \\ n_n &= \frac{1}{\sqrt{1 + (u^2 + w^2)}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Направляющие косинусы нормали l_n, m_n, n_n , выразим через два направляющих угла ϑ и γ , которые выберем так, чтобы

$$l_n = \sin \vartheta; \quad m_n = \cos \vartheta \sin \gamma; \quad n_n = \cos \vartheta \cos \gamma; \quad (19)$$

поэтому

$$\vartheta = \arcsin l_n; \quad \gamma = \arctg m_n/n_n. \quad (20)$$

Если выбрать более трех точек в изображении видимого горизонта и измерить их координаты, то при некоторых предположениях оценки углов ϑ и γ можно получить следующим образом. Каждая i -я точка изображения горизонта позволяет записать такое уравнение:

$$\begin{aligned} (l_i \cos \tilde{\vartheta} - \tilde{m}_i \sin \tilde{\vartheta} \sin \tilde{\gamma} - \tilde{n}_i \sin \tilde{\vartheta} \cos \tilde{\gamma}) \Delta \vartheta + \\ + (\tilde{m}_i \cos \tilde{\vartheta} \cos \tilde{\gamma} - \tilde{n}_i \cos \tilde{\vartheta} \sin \tilde{\gamma}) \Delta \gamma + \\ + \delta \eta_i + \Delta \eta_i + l_i l_n + \tilde{m}_i \tilde{m}_n + \tilde{n}_i \tilde{n}_n = 0, \end{aligned} \quad (21)$$

где $\tilde{l}_i, \tilde{m}_i, \tilde{n}_i$ — направляющие косинусы сканирующего луча, вычисленные по измеренным значениям $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i$ координат точек горизонта; $\tilde{\vartheta}, \tilde{\gamma}$ — приближенные оценки углов ϑ, γ ; $\delta \eta_i$ — систематическая часть отклонения угла η_i от 90° ; $\Delta \eta_i$ — случайная часть отклонения угла η_i от 90° ; $\Delta \vartheta = \bar{\vartheta} - \tilde{\vartheta}$; $\Delta \gamma = \bar{\gamma} - \tilde{\gamma}$ ($\bar{\vartheta}, \bar{\gamma}$ — искомые оценки направляющих углов ϑ и γ).

Систематическую часть $\delta \eta_i$ отклонения угла η_i от 90° представим в виде следующей функции от координат точек изображения горизонта:

$$\delta \eta_i = c_{00} + c_{10} \tilde{x}_i + c_{01} \tilde{y}_i + c_{11} \tilde{x}_i \tilde{y}_i + c_{20} \tilde{x}_i^2. \quad (22)$$

Таким образом, если в изображении горизонта измерены координаты n точек, то можно составить систему уравнений

$$BX + H + W = 0, \quad (23)$$

где

$$X = \begin{pmatrix} \Delta \vartheta \\ \Delta \gamma \\ c_{00} \\ c_{10} \\ c_{01} \\ c_{11} \\ c_{20} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & b_{n4} & b_{n5} & b_{n6} & b_{n7} \end{pmatrix}, \quad (24)$$

$$b_{i1} = l_i \cos \tilde{\vartheta} - \tilde{m}_i \sin \tilde{\vartheta} - \tilde{n}_i \sin \tilde{\vartheta} \cos \tilde{\gamma},$$

$$b_{i2} = \tilde{m}_i \cos \tilde{\vartheta} \cos \tilde{\gamma} - \tilde{n}_i \cos \tilde{\vartheta} \sin \tilde{\gamma}, \quad b_{i3} = 1, \quad b_{i4} = \tilde{x}_i,$$

$$b_{i5} = \tilde{y}_i, \quad b_{i6} = \tilde{x}_i \tilde{y}_i, \quad b_{i7} = \tilde{x}_i^2 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (25)$$

$$H = \begin{pmatrix} \Delta \eta_1 \\ \Delta \eta_2 \\ \Delta \eta_3 \\ \vdots \\ \Delta \eta_n \end{pmatrix}, \quad W = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \vdots \\ \omega_n \end{pmatrix},$$

$$\omega_i = l_i l_n + \tilde{m}_i \tilde{m}_n + \tilde{n}_i \tilde{n}_n.$$

При $n > 7$ система уравнений будет переопределенной. Из всех возможных ее решений, образующих совокупность оценок поправок в измеренные координаты v_{x_i}, v_{y_i} ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) и оценок поправок $\Delta\eta_i, \Delta\vartheta, \Delta\gamma$ в углы $\eta_i, \vartheta, \gamma$, в соответствии с рекомендациями обобщенного метода наименьших квадратов будем искать такие, которые бы минимизировали функционал

$$I = V^T K^{-1} V + H^T H \quad (26)$$

при ограничении вида

$$\Phi_i = \bar{l}_i \bar{l}_n + \bar{m}_i \bar{m}_n + \bar{n}_i \bar{n}_n = 0, \quad (27)$$

где

$$V = \begin{pmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ \vdots \\ v_{x_n} \\ v_{y_n} \end{pmatrix} \text{ — вектор поправок в измеренные по панораме координаты,}$$

$$\bar{l}_i = \cos \bar{\alpha}_i \cos \bar{\beta}_i, \quad \bar{m}_i = -\sin \bar{\alpha}_i \cos \bar{\beta}_i, \quad \bar{n}_i = \sin \bar{\beta}_i; \quad (28)$$

$$\bar{\alpha}_i = k_\alpha (\tilde{x}_i + v_{x_i}) + \Delta\alpha_i$$

$$\bar{\beta}_i = \beta_0 + k_\beta (\tilde{y}_i + v_{y_i}) + \Delta\beta_i, \quad (29)$$

$$\bar{l}_n = \sin (\tilde{\vartheta} + \Delta\vartheta),$$

$$\bar{m}_n = \cos (\tilde{\vartheta} + \Delta\vartheta) \sin (\tilde{\gamma} + \Delta\gamma),$$

$$\bar{n}_n = \cos (\tilde{\vartheta} + \Delta\vartheta) \cos (\tilde{\gamma} + \Delta\gamma),$$

K^{-1} — матрица, обратная корреляционной матрице измеренных величин.

Задача сводится к минимизации функционала

$$I^* = V^T K^{-1} V + H^T H - 2(BX + TV - H - W)^T \Lambda, \quad (30)$$

где Λ — вектор неопределенных множителей Лагранжа;

$$T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y_1} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_2} & \frac{\partial \Phi_2}{\partial y_2} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_n}{\partial x_n} & \frac{\partial \Phi_n}{\partial y_n} \end{pmatrix}.$$

Для этого необходимо приравнять нулю градиенты функционала по оцениваемым переменным, т. е.

$$\begin{aligned}\frac{\partial I^*}{\partial V} &= 2K^{-1}V - 2T^T\Lambda = 0, \\ \frac{\partial I^*}{\partial H} &= 2H - 2\Lambda = 0, \\ \frac{\partial I^*}{\partial X} &= -2B^T\Lambda = 0, \\ \frac{\partial I^*}{\partial \Lambda} &= BX + TV - H - W = 0.\end{aligned}\tag{34}$$

Получим систему уравнений

$$\begin{aligned}K^{-1}V - T^T\Lambda &= 0, \quad H - \Lambda = 0, \quad B^T\Lambda = 0, \\ BX - TV - H - W &= 0.\end{aligned}\tag{32}$$

Отсюда

$$\begin{aligned}V &= KT^T\Lambda, \\ \Lambda &= (E - TKT^T)^{-1}(BX - W), \\ X &= [B^T(E - TKT^T)^{-1}B]^{-1}B^T(E - TKT)^{-1}W.\end{aligned}\tag{33}$$

Полученные значения углов наклона по изложенному алгоритму совпали в пределах точности измерений с величинами аналогичных углов, полученными в главе VI.

Сравним значения углов между осями панорамирования и нормалью к аппроксимирующей снятую поверхность плоскостям со значениями установочных углов телевизионных камер. Можно заключить, что вертикальные конструктивные оси спускаемых аппаратов с точностью оценок совпадают с этими нормалью.

Датчики вертикали, установленные на «Венере-9» и «Венере-10», позволили определить направление отвесной линии в конструктивных осях посадочных аппаратов. Так, посадочный аппарат «Венеры-9» произвел посадку на наклонную поверхность, а «Венеры-10» — на поверхность, близкую к горизонтальной.

ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЕНЕРИАНСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для выполнения топографической интерпретации изображений было выполнено их трансформирование в топографический план, в фотоплан и в изображение, соответствующее панораме, у которой ось панорамирования совпадает с нормалью к аппроксимируемой плоскости (рис. 13—15).

Первое преобразование было выполнено в соответствии с соотношениями (8) и (9).

Трансформирование изображений с осью панорамирования, совпадающей с нормалью к снятой поверхности, выполнялось с помощью вычислительного комплекса, описанного в первом разделе. Трансфор-

мирование телевизионных панорам в ортогональную проекцию местности на аппроксимирующую плоскость выполнялось графоаналитическим способом.

Для этого в проекции телевизионных панорам были построены трансформационные сетки, являющиеся изображением сетки полярных координат в плоскости, проходящей через основание посадочного кольца станции. За начало системы полярных координат была выбрана проекция на эту плоскость центра панорамирования, а полярная ось системы совмещалась с проекцией оси панорамирования.

Трансформационные сетки были построены на прозрачном материале. При обработке изображений они накладывались на панорамы и контуры изображений переносились на план по соответствующим ячейкам сеток. Построенные таким образом топографические схемы мест посадок станций «Венера-9» и «Венера-10» приведены на рис. 15.

Топографическое дешифрирование исходных телевизионных панорам, составленных по ним топографических схем мест посадки и панорам, преобразованных к проекции с вертикальной (по отношению к снятой местности) осью панорамирования, позволяют высказать следующие суждения о характере венерианской поверхности, изобразившейся на этих панорамах.

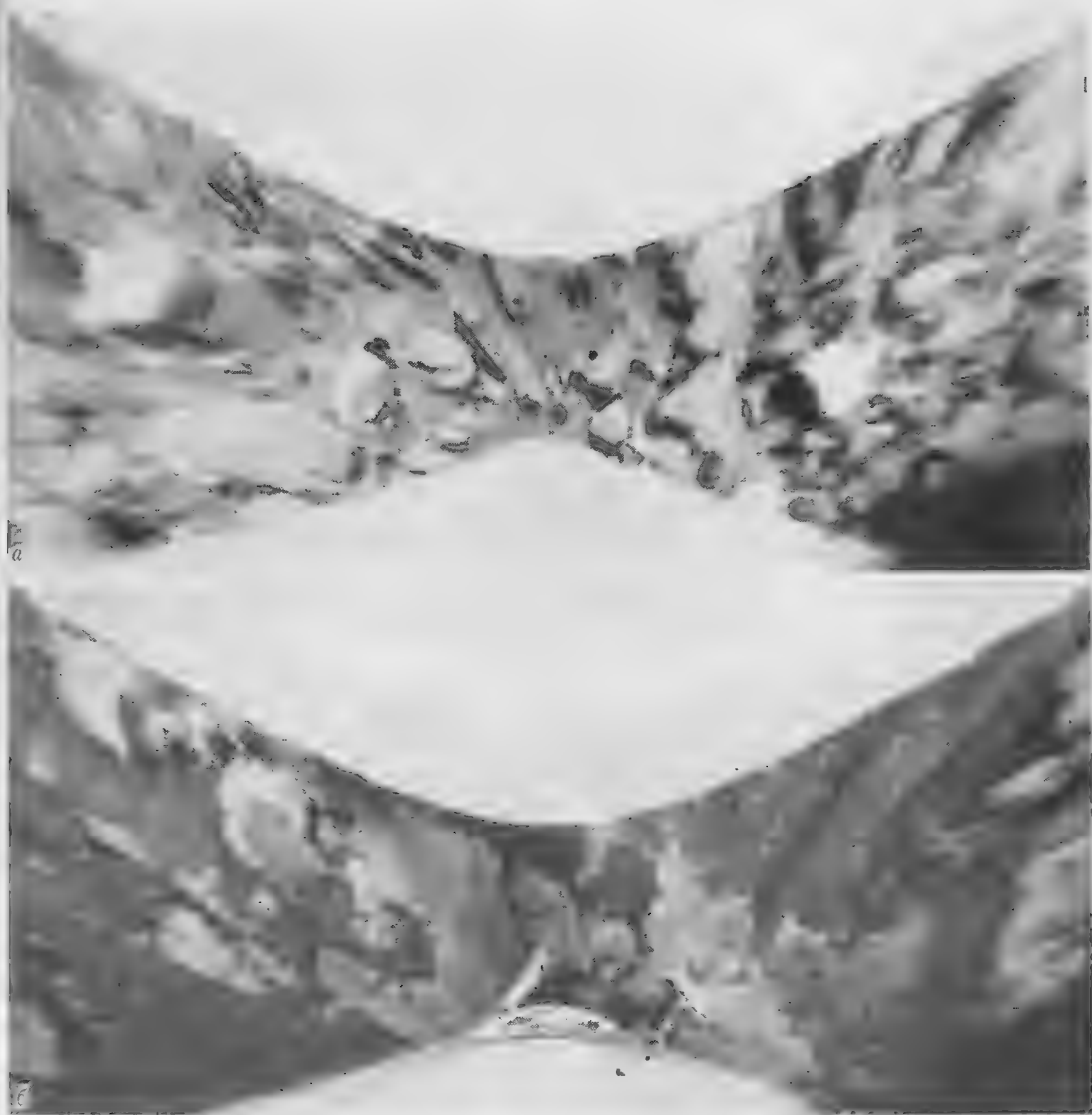
Видимый на телевизионной панораме «Венеры-9» участок поверхности, вероятно, является склоном кратера диаметром порядка 60—80 м. Причем станция совершила посадку очень близко к центру кратера и практически находится на его днище. Об этом помимо данных, полученных при определении ориентации камер, свидетельствует и обилие камней, являющихся основным элементом топографической ситуации. При этом из крупных камней преобладают камни размером 30—40 см. Форма камней самая различная, большинство из них имеют острые грани без заметных следов эрозии. Это свидетельствует о сравнительно молодом их возрасте, а также о природе их образования, связанной с экзогенными или эндогенными процессами растрескивания.

Отдельные камни имеют слоистую структуру и по своему виду несколько напоминают вулканические бомбы.

Поверхность между камнями практически сплошь заполнена обломочным материалом размером 1—4 см и менее.

На панораме можно проследить два разрыва структуры (*B* и *C* на рис. 16). С точностью до нескольких градусов оба разрыва оказываются дугами малых кругов, параллельными линии видимого горизонта. Эта линия видимого горизонта является, вероятно, бровкой кратера, склон которого изобразился на панораме. Естественно предположить, что в процессе посадки спускаемый аппарат несколько сдвинулся по склону вниз, а зона, располагающаяся между линиями *C* и *D*, представляет собой участок, потревоженный в процессе посадки. Это предположение, по-видимому, подтверждается тем, что средняя часть зоны свободна от крупных камней. Камни в левой части зоны имеют следы разрушений, которые, возможно, связаны с посадкой.

О сравнительно невысокой прочности камней на участке посадки «Венеры-9» помимо разрушенных камней в левой части зоны *CD*, по-видимому, свидетельствует и то обстоятельство, что наклон станции относительно среднего уклона места мал. Действительно, при поверче-



Фотопланы, полученные из панорам «Венеры-9» (а) и «Венеры-10» (б)

Рис. 13

нике опорного кольца станции ~ 2 м, среднем размере камня $\sim 0,3$ м и расстоянии между камнями, сравнимом с их поперечником, трудно ожидать, чтобы опорное кольцо легло одновременно на три одинаковых камня. Если бы кольцо лежало на одном или двух камнях, наклон станции относительно местной нормали должен был бы составлять $\sim 10^\circ$. Таким образом, наиболее вероятной кажется гипотеза, что кам-

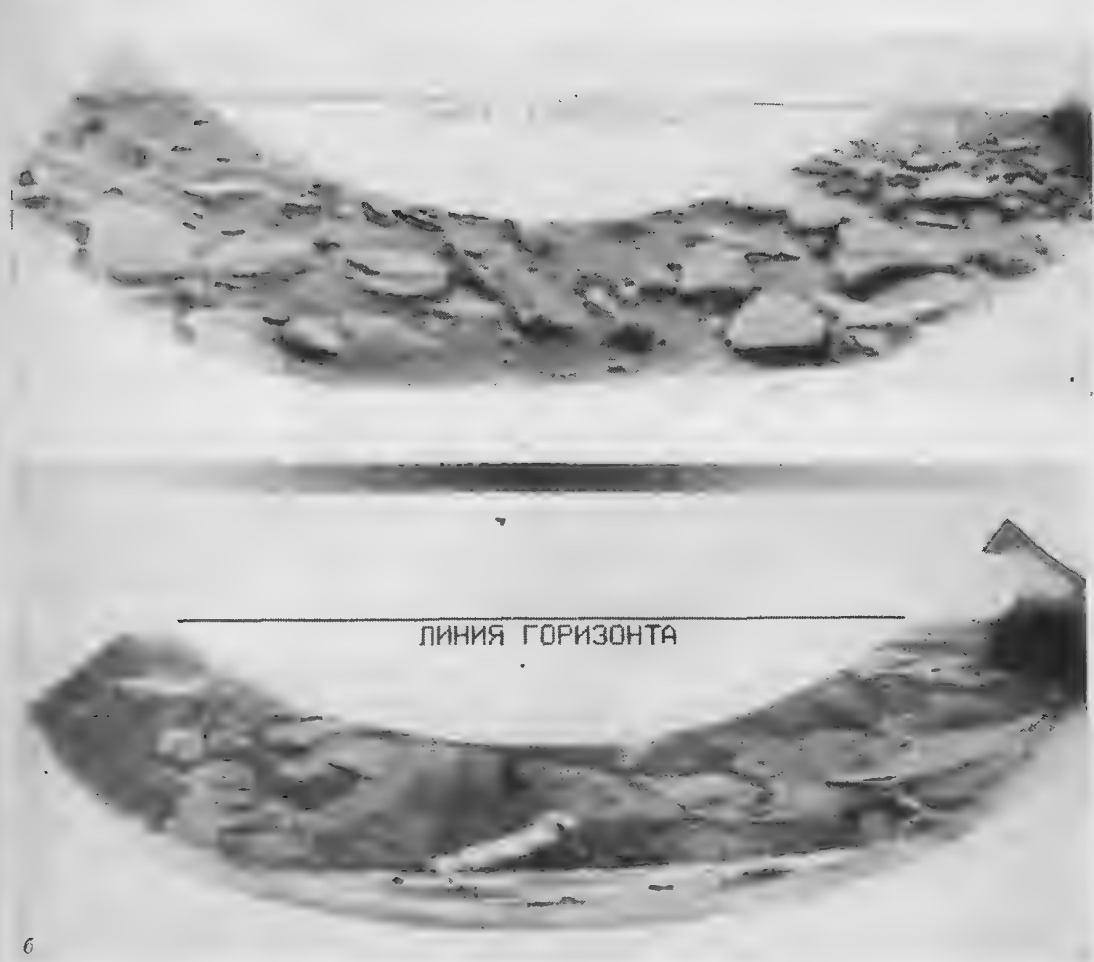
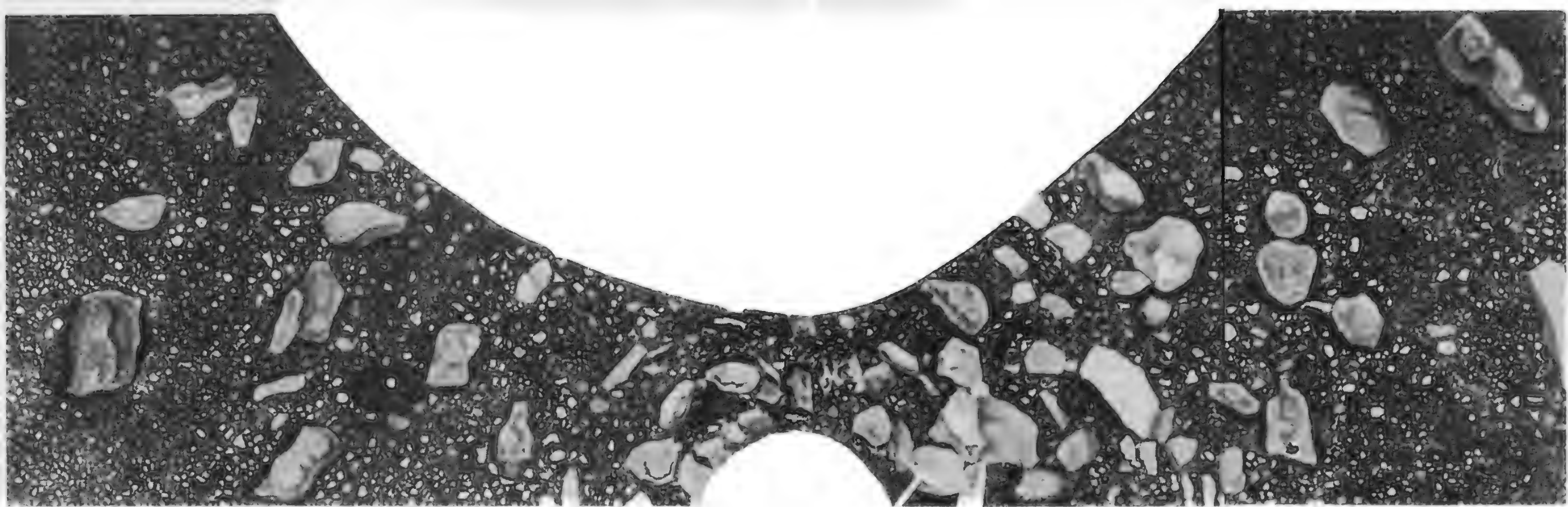


Рис. 14 Преобразованные панорамы «Венеры-9» (а) и «Венеры-10» (б)

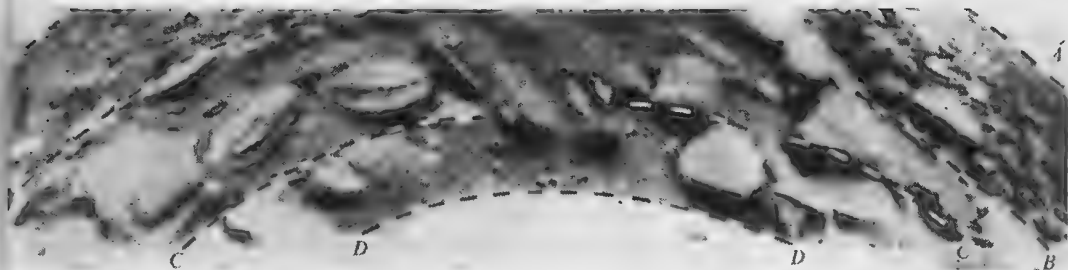
ни, попавшие под опорное кольцо, были раздавлены при посадке. На сравнительно малую прочность камней указывает также и то, что располагающиеся слева пад разрывом C три камня, возможно, представляют собой фрагменты некогда единого образования. В пользу такого предположения говорит одинаково ориентированная «щель» на камнях, а также то, что очертания верхнего правого края нижнего камня близко повторяют очертания соседствующего с ним.

Оценки прочности породы можно получить, предполагая, что кинетическая энергия станции в момент посадки была израсходована на разрушение породы. Если бы при этом были разрушены камни, попавшие под опорное кольцо, то, полагая, что 10% эффективного сечения опорного кольца S занято камнями с характерной высотой h ,



Топографические схемы мест посадки автоматических станций «Венера-9» (а) и «Венера-10» (б)

Масштаб 1 : 50, система координат условная. Схема составлена в ЦНИИ геодезии, аэросъемки и картографии (1976 г.)



Панорама «Венеры-9» с обозначенными разрывами структуры

Рис. 16

при массе станции m и скорости v , имеем

$$\frac{mv^2}{2} = 0,1ShP_{кр},$$

где $P_{кр}$ — критическое давление. Полагая $m = 700$ кг, $v = 8$ м/с, $S = 0,6$ м², получаем $P_{кр} \approx 40$ кг/см². Заметим, что если единственным камнем, разрушенным при посадке, является полуразрушенный призматический камень у разрыва по линии C слева, то верхний предел прочности для него не превосходит ~ 300 кг/см². С другой стороны, удар плотномером не вызвал обнаруживаемых на панораме разрушений породы. В этом случае можно оценить нижний предел прочности породы. Если прочность всех камней одинакова, то $P_{кр}$ заключено в пределах $300 \text{ кг/см}^2 \leq P \leq 10 \text{ кг/см}^2$. Альтернативная интерпретация сводится к утверждению, что на панораме видны как камни, прочность которых 300 кг/см^2 , так и камни, прочность которых больше 10 кг/см^2 . Следует также отметить, что сравнение участков панорам, полученных при прямом и обратном ходе сканера, не выявило каких-либо смещений станции. По-видимому, учитывая неопределенность исходных данных, можно полагать, что породы в месте посадки «Венеры-9» близки или уступают по прочности земным вулканическим породам типа туфов, но значительно превосходят по своим механическим свойствам лунный грунт.

Если высказанные соображения верны, то рельеф местности представляет собой сравнительно крутой склон. Судя по обилию камней, этот склон является стенкой кратера, в котором расположена лунка, ограниченная бровкой B , близ дна которой (разрыв C) совершил посадку аппарат. Характерные размеры зоны C и лунки B могут быть определены, если известна высота камеры относительно грунта. Неопределенность связана с двумя обстоятельствами. Во-первых, неизвестен коэффициент постели грунта и, следовательно, неизвестно, насколько погружено в грунт опорное кольцо. Во-вторых, неизвестен наклон стенок лунки в зоне CB . Очевидно, что погружение опорного кольца не может превосходить его высоту. С другой стороны, судя по изображению, в месте посадки «Венеры-9» хорошо представлена мелкая фракция грунта, обладающая малым сцеплением. В таком случае естественно принять, что угол откоса близок к 40° . Поскольку общий уклон местности вряд ли превосходит 30° , уклон стенок лунки в зоне CB относительно средней поверхности может достигать 10° .

Предполагая, что зона *CD* почти параллельна плоскости посадочного кольца аппарата, получим, что край зоны *C* отстоит от края посадочного кольца на 0,8—1 м, а бровка *B* на 2—2,5 м. Песколько сложнее вопрос с оценкой расстояния до видимого горизонта. Видимый на панораме горизонт повсюду на 4—6° выше математического горизонта аппарата. Это, по-видимому, наиболее естественно интерпретируется предположением, что видимый горизонт является бровкой кратера. Расстояние до него в таком случае оценивается в 60—80 м.

В качестве предположительной интерпретации топографической ситуации можно выдвинуть гипотезу, что станция «Венера-9» совершила посадку на покрытом каменной россыпью внутреннем склоне кратера диаметром ~200 м и глубиной ~6 м, в лунке с характерными размерами ~5 м и глубиной ~0,5 м. Камни обладают прочностью, сравнимой с прочностью вулканических туфов. Скульптура камней сложна, но микроструктура поверхности такова, что индикатриса рассеяния света близка к ламбертовой. Действительно, обращенные к зениту поверхности камней на панораме кажутся сравнительно яркими, а обращенные вниз по склону — затененными, что при низком альбедо поверхности (~0,1) естественно, поскольку для обращенных вниз поверхностей камней падающий поток ограничен малым телесным углом.

Панорама, переданная с «Венеры-10», по-видимому, не содержит скачков структуры изображения, которые можно рассматривать как проявление деталей рельефа, больших по сравнению с размерами посадочного аппарата, аналогичных обнаруживаемым на панораме «Венеры-9». Видимо, можно считать, что панорама изображает сравнительно ровный участок поверхности, что подтверждается близостью левого участка горизонта к математическому горизонту станции.

Для интерпретации тонкой структуры светлых и темных деталей, видимых на панораме «Венеры-10», изображение было подвергнуто цифровой обработке, резко усиливающей локальные контрасты (см. рис. 10, 11). Полученный фотометрический рельеф оказался чрезвычайно сложным и изрытым. В земных условиях такого рода рельеф характерен для изъязвленной поверхности ячеистого выветривания. Светлые детали рельефа в ряде мест рассечены трещинами. Поскольку трещины не наблюдаются на темных деталях рельефа, а структура поверхности здесь близка к структуре межкаменных участков на панораме «Венеры-9», представляется естественным предположить, что темные участки заполнены продуктами денудации светлых областей. Цифровое усиление локальных контрастов панорамы «Венеры-9» (см. рис. 10) не привело к выявлению новых деталей структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кронрод М. А., Чочиа П. А. Специализированная диалоговая система по обработке изображений. — В кн.: Всесоюзное совещание по автоматизации научных исследований. Рига: Зинатне, 1975, с. 341—342.
2. Беликова Т. П., Кронрод М. А., Чочиа П. А., Ярославский Л. П. — Цифровая обработка фотоснимков поверхности Марса, переданных АМС «Марс-4» и «Марс-5». — Космич. исслед., 1975, № 6.
3. Беликова Т. П., Ярославский Л. П. Использование адаптивных амплитудных преобразований для преобразования изображений. — Вопр. радиоэлектроники, сер. общетехн., 1974, вып. 4, с. 88.
4. Кронрод М. А. Несколько задач обработки изображений. — Вопр. кибернетики, 1978, вып. 38.

До получения первых панорамных изображений единственным источником сведений о характере рельефа и некоторых других свойствах поверхности Венеры была радиолокация с Земли. Радиолокационными наблюдениями было установлено, что перепады высот в экваториальной зоне Венеры могут достигать нескольких километров на базе в сотни километров [1, 2]. Средняя величина диэлектрической проницаемости поверхности Венеры определена равной $4,7 \pm 0,8$ [2], что соответствует средней плотности материала поверхности $2,3 \pm 0,4$ г/см³ [3]. Шероховатость поверхности Венеры в масштабе использованных для радиолокации длин волн (дециметры) по радиоизмерениям оказалась меньшей, чем у поверхности Луны. Было обнаружено, что поверхность Венеры по отражательной способности в радиодиапазоне неоднородна, что может быть вызвано различиями в составе пород поверхности, а также в высоте и степени шероховатости (микрорельефе) лоцируемого места. Поляризационные измерения показывают, что светлые на радарном изображении участки обладают более расчлененным микрорельефом [4]. О природе макрорельефа поверхности Венеры достоверных сведений не было.

Подробное описание параметров телевизионной системы приведено в главе VI настоящего сборника. Здесь перед описанием изображений необходимо напомнить, что они получены панорамной телевизионной камерой, ось панорамирования которой при посадке на ровную горизонтальную поверхность отклонена от вертикали на 50° . Из-за этого средняя часть панорамы содержит перспективное изображение поверхности перед камерой в непосредственной близости от нее, а краевые части включают также изображение более удаленных участков слева и справа от камеры. Горизонт в таком изображении должен быть виден только на краях панорамы как наклонная линия. Посадка аппарата с креном будет вносить в изображение дополнительные искажения. Угловое разрешение телекамеры $\sim 1/3$ градуса. Номинальное поле зрения $40 \times 180^\circ$. Иллюминатор телекамеры находится на высоте около 0,9 м от поверхности.

Панораму, полученную станцией «Венера-9», в дальнейшем для краткости будем называть I, а панораму станции «Венера-10» — II. Мозаичные вертикальные полосы на первичных (необработанных) панорамных изображениях, соответствующие интервалам времени, когда при непрерывном движении сканирующего устройства передача видеосигнала прекращалась и шла передача другой телеметрической информации, разбивают поле панорамы на зоны, удобные для целеуказаний описываемого объекта (1—7 на I и 0—7 на II). Дополнительно разде-

лим панорамы на две части: нижнюю (ближнюю) часть — зона А и верхнюю (дальнюю) — зона В. Этой же системой целеуказаний мы будем пользоваться и на специальным образом обработанных изображениях, не содержащих вертикальных полос.

В поле зрения телекамер «Венеры-9» и «Венеры-10» входят часть кольцевой опоры посадочного аппарата (АЗ, 4, 5) и датчик гамма-плотномера (А5). На кольцевой опоре видны фотометрические марки длиной 20 и шириной 3,5 см. Длина поперечной части датчика гамма-плотномера около 40 см. На панораме «Венеры-10» (II АЗ) вида отстреленная при посадке секционная крышка иллюминатора телекамеры. Длина ее около 40, ширина 10 см. Размеры этих деталей аппаратов использовались для оценки размеров расположенных поблизости образований венерианской поверхности.

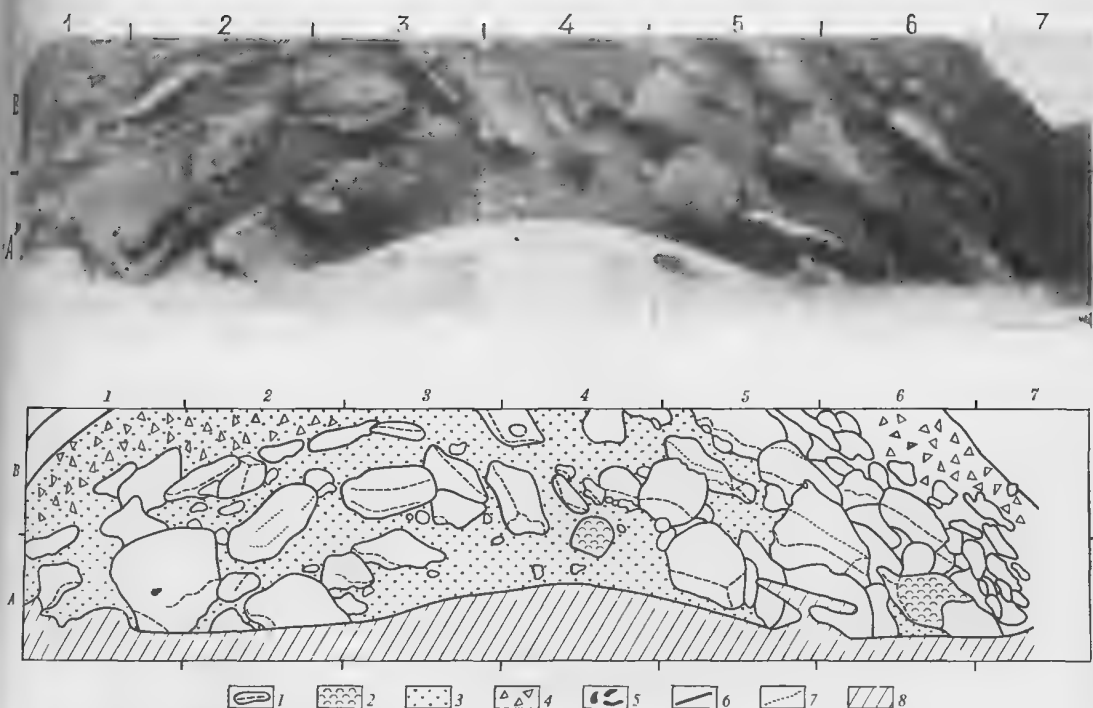
ПАНОРАМА «ВЕНЕРЫ-9»

Спускаемый аппарат «Венеры-9» совершил посадку на северо-восточном окончании области Бета, отличающейся повышенной отражательной способностью в радиодиапазоне (см. карту в гл. II, с. 17). Аппарат достиг поверхности в пределах россыпи камней (рис. 1). Линия горизонта в верхних углах панорамы располагается асимметрично, так как осьшь покрывает склон крутизной около 30°. На линии горизонта в правой части видны выступы, очевидно, это камни. Если принять, что их размер тот же, что и вблизи станции, то удаленность горизонта не превышает нескольких десятков метров, что согласуется с выводом о посадке на склон. Между камнями видна бугорчатая поверхность относительно более темного грунта. Камни довольно крупные (поперечником до 50—70 см), но относительно невысокие (не более 15—20 см). В непосредственной близости от аппарата камни занимают около половины наблюдаемой площади, а в промежутках между ними видна поверхность несколько иного типа, видимо, это относительно мелкозернистый грунт.

Общая освещенность поверхности оказалась такова, что с трудом и неуверенно можно выделить участки, подсвеченные искусственно. Затененные места на деталях рельефа в поле зрения телекамеры (угол панорамного обзора около 180°) везде направлены в сторону посадочного аппарата, что указывает на отсутствие прямого солнечного света и освещение поверхности рассеянным светом неба.

Судя по показаниям бортового наклономера, спускаемый аппарат при посадке наклонился примерно на 30° в направлении, отстоящем от центра поля зрения телекамеры в плане на угол около 140° против часовой стрелки, т. е. влево и назад. Соответственно горизонт в правой части панорамы виден несколько ближе к центру панорамы, чем на модельных изображениях, полученных без наклона аппарата. В левой части панорамы изображение было отягощено многочисленными помехами. После обработки изображения на ЭВМ в левой части панорамы проявилось светлое поле — возможно, изображение неба.

Наклон аппарата может быть вызван общим уклоном местности (посадка на склон) или неровностями микрорельефа (например, камни на ровной горизонтальной поверхности) либо комбинацией этих



Панорама станции «Венера-9» и схема дешифрирования панорамного изображения участка венерианской поверхности

Рис. 1

1 — обломки скальных пород; 2 — обломки, напоминающие брекчию; 3 — грунт; 4 — нерасчлененная каменная россыпь; 5 — ячеистые углубления на камнях; 6 — трещины; 7 — фрагменты каменных ребер, имеющие эрозионную природу; 8 — детали станции «Венера-9»

двух причин (рис. 2). В данном случае главной причиной наклона аппарата, по-видимому, является посадка на склон, так как альтернативное объяснение требует посадки на камень высотой около 90 см, причем этот камень должен быть под той частью кольцевой опоры спускаемого аппарата, которая находится в поле зрения телекамеры (около штанги гамма-плотнмера). Таких высоких камней в поле зрения нет, и, вероятно, они не характерны для этого участка. Кроме того, в случае посадки на такой камень датчик гамма-плотнмера завис бы над поверхностью, а не лежал бы на невысоких плоских камнях, что хорошо видно на панораме.

Сравнение с панорамой «Венеры-10» показывает, что длина видимой части штанги плотнмера «Венеры-9» примерно в два раза меньше, чем «Венеры-10», т. е. в первом случае штанга плотнмера опустилась ниже, чем во втором. Это свидетельствует о том, что местный наклон (на базе посадочного кольца аппарата — около 2 м) у станции «Венера-9» по линии плотномер — центр панорамирования (назад и влево) больше, чем

у станции «Венера-10». Разница наклонов станций по оценке путем графических построений составляет 5—8°. Как будет показано ниже, станция «Венера-10» в свою очередь наклонена назад и влево на несколько градусов, и этот наклон, скорее всего, также является местным. Исходя из этого можно оценить местный наклон станции «Венера-9» в 10—15°. Вероятнее всего, он вызван расположением прилегающей к плотномеру части посадочного кольца на камне высотой около 25 см. В этом случае крутизна склона в месте посадки станции «Венера-9» составляет 15—20° (рис. 3).

Дополнительным аргументом в пользу вывода о посадке на склон является характер горизонта в правой части панорамы. Здесь по линии раздела светлого неба и более темной поверхности различаются нечетко выраженные детали рельефа с угловыми размерами около 1° (поперечник их составляет 3—4 элемента изображения). В направлении к аппарату эти неясные детали рельефа постепенно переходят в четко выраженные камни. Если предположить, что эти детали рельефа на горизонте тоже камни и что их размеры такие же, как у камней вблизи аппарата (поперечник не более 1 м), то из элементарных геометрических построений следует, что расстояние до них не превышает нескольких десятков метров. Даже если размеры этих камней на порядок больше, что представляется весьма маловероятным, удаленность линии видимого на этой панораме горизонта не превышает сотен метров, что существенно меньше, чем теоретическая удаленность горизонта на венерианских равнинах (~3,5 км с высоты 1 м). Такая аномальная близость горизонта хорошо согласуется с выводом о посадке на склон.

Камни в россыпи обычно имеют уплощенную пластинообразную форму с типичным отношением высот к поперечнику в плане от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{6}$. Эти грубые пластины, как правило, лежат на широкой грани, и лишь в отдельных случаях (I B3, B2) пластины «стоят», прислонившись к другому камню. На многих камнях видны ступенчатые отколы (см., например, I B2 и B3, а также рис. 4). Эта особенность камней вместе с их пластинообразной формой свидетельствует о плоскопараллельной пластинообразной отдельности, характерной для слагающих эти камни венерианских горных пород.

У пластинообразных камней хорошо просматриваются широкие верхние грани. Круто наклонные узкие боковые грани затенены и видны плохо. Поверхность широких верхних граней относительно ровная, с отдельными, в различной степени выраженными перегибами. Окраска однородная. Лишь в некоторых случаях (например, у камня слева от датчика гамма-плотмера (I A5)) на поверхности камней видны неясно выраженные темные пятна поперечником 2—3 см.

Ребра пластинообразных камней обычно ровные, прямые или слабо изогнутые и лишь иногда несколько зигзагообразные (B5). У некоторых камней (I B5, B6, A6) имеются узкие острые выступы длиной 15—20 см (рис. 5), которые могут представлять собой более крепкий участок породы. Характерной особенностью большинства камней является острота и несглаженность их ребер. Создается впечатление, что эти камни образовались за счет разрушения достаточно прочных горных пород скального типа и впоследствии не подвергались заметной обработке поверхностными факторами. Последнее обстоятельство естествен-

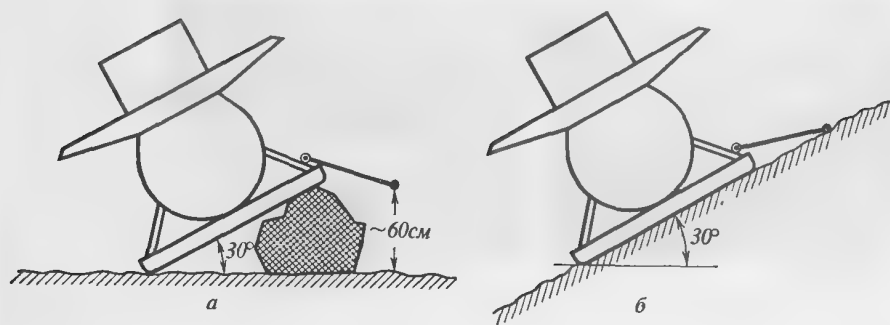


Рис. 2

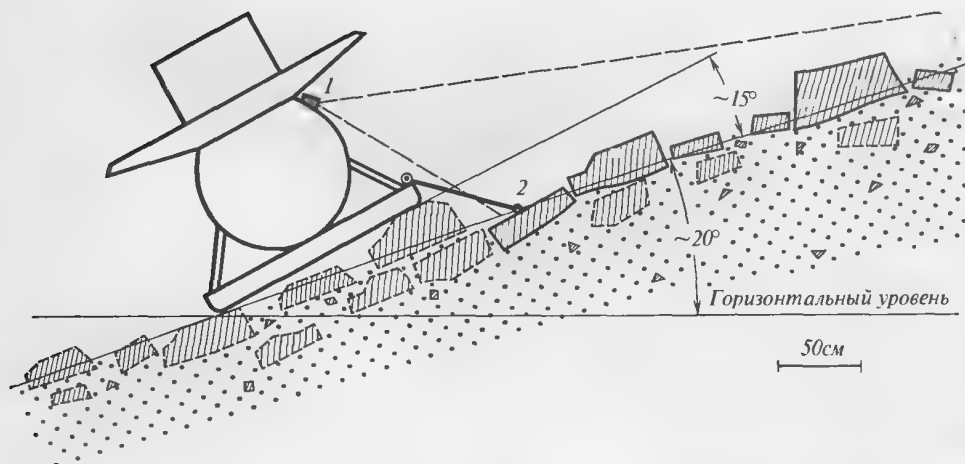


Рис. 3

Возможные причины наклона станции «Венера-9»

a — посадка на крупный камень; *b* — посадка на склон. Оба случая отличаются положением штанги гамма-плотнмера (показана черной линией)

Положение станции «Венера-9» на поверхности и строение приповерхностного слоя, предполагаемые на основании анализа панорамы

Камни заштрихованы, сплошной линией контура выделены камни, наблюдаемые на панорамах. Точками показан грунт. Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковы. 1 — телекамера (штриховые линии, отходящие от нее, ограничивают поле зрения); 2 — датчик плотнмера

но рассматривать как свидетельство геологической молодости ландшафта.

Кроме охарактеризованных выше остроугольных пластинообразных камней в поле зрения телекамеры станции «Венера-9» изредка видны камнеподобные образования иного облика. Из них лучше всего просматривается камень неправильной формы поперечником около

Рис. 4

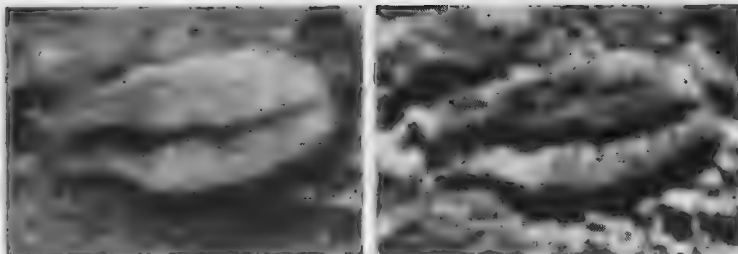


Рис. 5

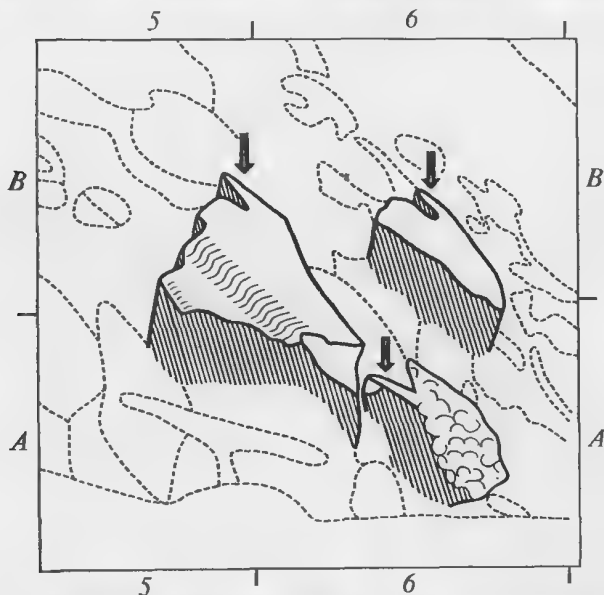
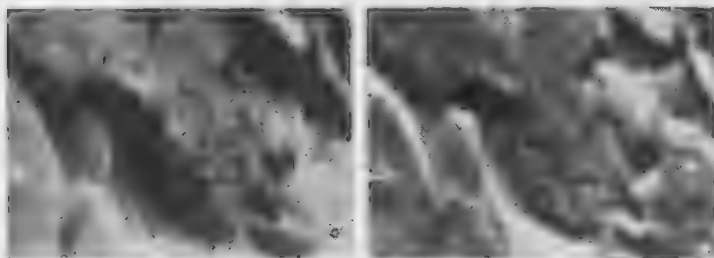


Рис. 6



Фрагмент панорамы «Венеры-9»

Камень с характерным ступенчатым отколом может свидетельствовать о наличии плоскопараллельной отдельности в венерианской породе. Здесь и на рис. 6 справа даны изображения тех же участков, полученные методом усиления местных контрастов (см. гл. VI), что позволяет увидеть дополнительные детали

Схема участка панорамы «Венеры-9», показывающая расположение камней с узкими острыми выступами

«Странный» камень со стержнеобразным выступом и бугорчатой поверхностью

40 см, расположенный правее и несколько дальше гамма-плотномера (I A6, см. также рис. 6). Возможно, родственным ему образованием является небольшой (10—15 см в поперечнике) камень округленно-изометричной формы вблизи центра панорамного изображения (на границе I A4 и B4).

Форму «странного» камня, расположенного правее гамма-плотномера, определить трудно. Он виден в сильной перспективе. Отличительным признаком этого камня является общая округленность обращенной к телекамере выпуклой стороны, которая сочетается с более темным, чем у пластинчатых камней, и пятнистым (вероятно, мелкобугристым) характером поверхности. Поперечные размеры пятен (бугорков?) — 3—5 см. В верхней части этого камня наблюдаются два четких округлых выступа-бугорка поперечником около 5 см и высотой около 3 см. Слева от описываемого камня отходит светлое удлиненное образование, которое дешифрируется как торчащий из камня стержневидный выступ более светлого материала длиной около 15 см и толщиной у основания около 5 см. Справа темная пятнистая поверхность описываемого камня по извилистой линии сочленяется с более светлой поверхностью, характер выражения которой в рельефе из-за близости к краю панорамы неясен. В целом этот пятнистый камень производит впечатление малопрочного (по крайней мере с поверхности) неоднородного образования типа слабо сцементированных брекчий.

Следует отметить, что похожую пятнистость фотоизображения имеют и еще целый ряд камней: у посадочного кольца (I A2), левый камень под плотномером (I A5) и соседний от него влево, камень на границе I B4 и B5, сравнительно крупные камни в I A3 и B4. Однако пятнистость у них выражена слабее, чем у «странного» камня, что может быть эффектом освещения, вызванным различным наклоном камней. Возможно, что пятнистость фотоизображения отражает не структуру брекчий, а избирательно эродированную поверхность массивных пород.

Стержневидный выступ «странного» камня (I A6) при перемещении его примерно на 15 см влево с небольшим поворотом против часовой стрелки совпадает с треугольным сколом на груботреугольном камне поперечником около 50 см (рис. 7). Весьма вероятно, что камень с выступом является частью крупного камня, отделившейся и сместившейся вправо. Различный рисунок фотоизображения двух камней является либо эффектом освещения различно наклоненных мелкобугристых поверхностей, либо отражает неоднородную структуру первичного камня.

Еще одним примером возможного разделения крупного камня на части являются три камня с характерными линейными выемками и выступами, расположенные в левой части панорамы (I A1, B2, B3). Специфическая форма выемки на правом камне (I B3) и выступа на среднем камне (I B2) позволяют предположить, что они были соединены, как показано на рис. 8. Там же показано вероятное соединение среднего и левого камней, выполненное путем совмещения параллельных ребер и линейной выемки на обоих камнях. Если принять подобную реконструкцию, то следует считать, что после разделения исходной глыбы (рис. 8, б) на обломки правый и средний из них сместились относительно более массивного левого соответственно на 60—70 и 6—8 см вправо.

Размеры реконструированных камней указывают на возможное падение в непосредственной близости от заснятого участка крупных глыб размером 1—1,5 м.

Поверхность, которая видна между камнями, заметно темнее, чем обращенные вверх грани. На ней различаются камешки или бугорки поперечником в несколько сантиметров и более мелкие (на пределе разрешения камеры) пятнышки неясной морфологии. Камни, образующие россыпь, производят впечатление свободно лежащих на этой поверхности (например, I A5, B5) и лишь иногда частично заглублены в нее (I A3). Несколько правее центра панорамы (I B5) наблюдается небольшой (видимый поперечник около 15 см) камень слегка удлиненной формы, который наклонно выступает из более темной поверхности. По совокупности перечисленных признаков поверхность между камнями, по-видимому, следует считать поверхностью относительно мелкозернистого пористого материала. Вероятно, это рыхлый, обладающий невысокой связностью грунт, так как он как бы присыпает сверху поверхность некоторых невысоких (первые сантиметры) камней (I A3). На поверхностях более высоких (10—20 см) камней «присыпок» грунта не видно. Основная масса частиц грунта, несомненно, имеет размеры меньше предела разрешения телекамеры (1—2 см вблизи аппарата). Однако, судя по четко выраженному «структурированному» характеру поверхности грунта, роль слабо связанных тонких фракций в этом грунте невелика.

Участок поверхности шириной в 20—30 см, примыкающий к средней части видимого на панораме посадочного кольца (I A3, 4), лишен крупных камней. Этот участок поверхности расположен выше по склону от аппарата, и предположительно можно допустить, что аппарат при посадке слегка съехал вниз по склону, увлекая за собой камни, и обнажил подстилающий грунт.

При анализе панорамы «Венеры-9» была сделана попытка определить гранулометрический спектр обломочного материала около посадочного аппарата. Подсчеты производились в центральной части панорамы ($\pm 45^\circ$ от центра). Поперечник камней определялся по их угловым размерам и удаленности от камеры, которая в свою очередь рассчитывалась по известной геометрии получения изображений. Наличие в поле зрения телекамер деталей станции с известными размерами давало возможность независимого контроля оценок размеров камней и расстояния до них. Следует подчеркнуть, что возможные неточности в определении расстояний приведут к ошибкам в определении размеров камней и в оценках величины площади поверхности, на которой производились подсчеты, но эти ошибки будут лишь смещать шкалы отсчета размеров камней и получаемых оценок плотности, не меняя наклона графика, отражающего характер гранулометрического спектра. Распространенность камней поперечником более 10 см подсчитывалась на площади 5 м² (32 камня), камни поперечником от 5 до 10 см подсчитывались на площади 1 м² (5 камней), а неясно выраженные бугорки и мелкие камешки на грунте с поперечными размерами от 3 до 5 см учитывались на двух участках грунта площадью около 0,1 м² каждый (в сумме 20 бугорков и камешков).

Результаты подсчетов приведены на рис. 9 в виде зависимости на-

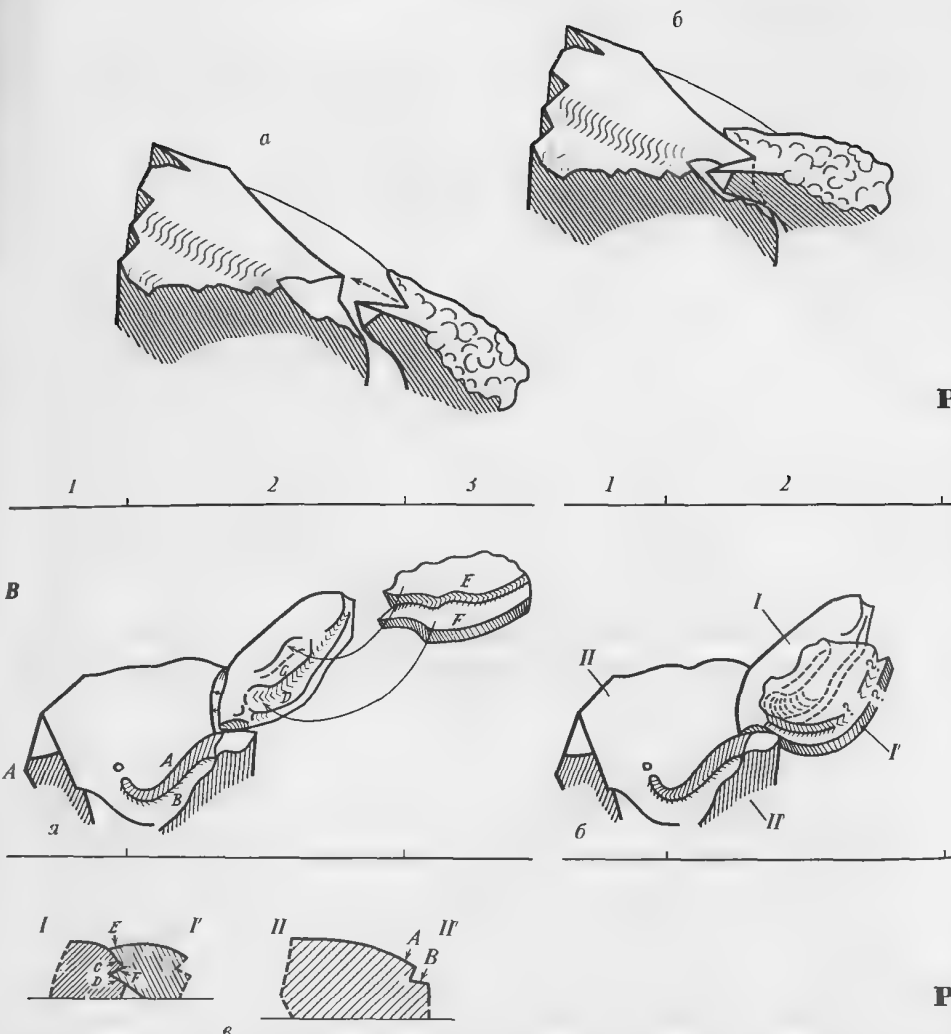


Рис. 7

Рис. 8

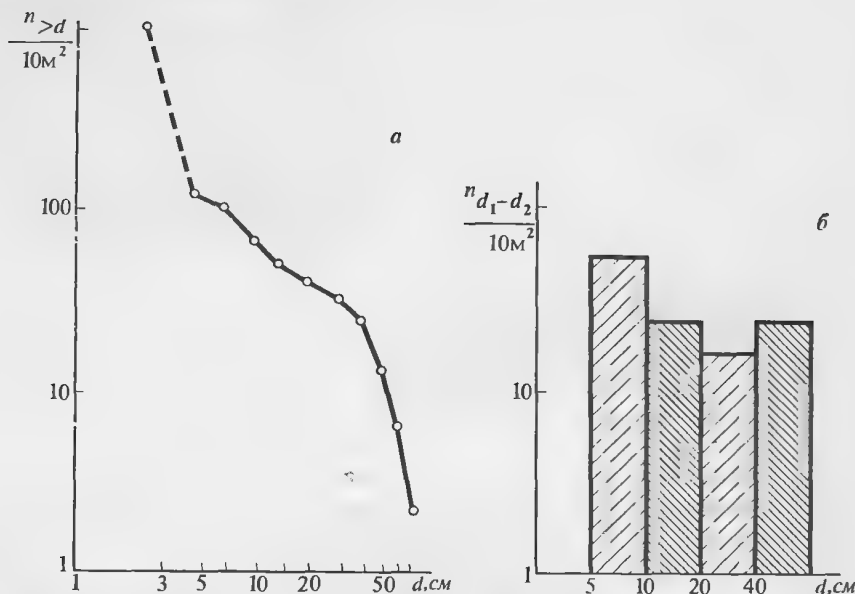
Схема расположения двух камней в правой части (А5, 6) панорамы «Венеры-9» (а) и возможное расположение этих же камней ранее (б)

Возможная реконструкция крупного камня в левой части панорамы «Венеры-9»

а — схема расположения камней на панораме, б — возможная реконструкция, в — поперечные разрезы по линиям, показанным на фрагменте б этого рисунка. Поверхности обозначены буквами так же, как на фрагменте а. Горизонтальные линии соответствуют верхней и нижней границам панорамы

копленной частоты встречаемости обломков (n на площади 10 м^2) от их поперечника (d , см). На приведенном графике выделяется три участка. В интервале размеров 3—5 см — бугорки и мелкие камешки на грунте — зависимость $n_{>d} = f(d)$ несомненно обратная, но более определенно су-

Рис. 9



Гранулометрический состав обломочного материала в месте посадки «Венеры-9»

a — кумулятивная зависимость количества камней n размером больше данного от их размера d ; *b* — зависимость $n = f(d)$ в форме гистограммы. Площадь нормирования для обоих рисунков 10 м^2

дить о ее характере по имеющимся данным невозможно. В интервале размеров от 5 до 40 см — средние камни — функция $n_{>d} = f(d)$ хорошо аппроксимируется обратной степенной зависимостью $n_{>d} = 10^{2,63} d^{-0,8}$. В интервале размеров от 40 до 70 см — крупные камни — функция $n_{>d} = f(d)$ удовлетворительно аппроксимируется обратной степенной зависимостью $n_{>d} = 10^{7,75} d^{-4}$. Камней поперечником более 70 см около аппарата не наблюдалось.

Таким образом, камни ($d > 5$ см) в россыпи имеют немонотонное бимодальное распределение по размерам, что хорошо выявляется как при построении интегральной (кумулятивной) зависимости — две ветви графика (см. рис. 9, *a*), так и при построении гистограммы дифференциальной (интервальной) зависимости — вторая мода в интервале 40—80 см. Бимодальность распределения обломочного материала с выраженной обогащенностью крупными фракциями характерна для осыпей Земли и Луны. В описываемом случае этот признак хорошо согласуется с тем обстоятельством, что место посадки «Венеры-9» расположено на достаточно крутом склоне. Распространенность мелких образований на грунте ($d = 3 \div 5$ см) не является продолжением зависимости, характерной для камней, что, вероятно, связано с участием иного (чем для камней, составляющих россыпь) фактора их возникновения.

Спускаемый аппарат «Венеры-10» достиг поверхности в 2000 км к югу от места посадки аппарата «Венеры-9». Этот участок поверхности расположен к юго-востоку от светлой радиолокационной области Бета (см. карту в гл. II, с. 17) и находится в зоне, обладающей умеренно высоким отражением радиоволн [1]. Место посадки аппарата станции «Венера-10» по ряду признаков заметно отличается от места посадки станции «Венера-9», но в отношении некоторых свойств поверхности эти участки оказались близки.

На полученной панораме (рис. 10) видно, что спускаемый аппарат станции «Венера-10» сел на относительно ровную поверхность слабо возвышающейся над окружающей местностью каменной глыбы поперечником не менее 3 м. На расстоянии нескольких метров от аппарата видны еще по крайней мере три такие же крупные глыбы и несколько более мелких. Поверхность глыбы испещрена темными пятнами, возможно углублениями, заполненными темным грунтом. В правой части глыбы виден гребнеобразный выступ, возможно эрозийного происхождения. Похожие выступы на глыбах, напоминающие отпрепарированную эрозией косую слоистость, видны на большем удалении от станции в правой части панорамы. В левой части панорамы на поверхности видны камни, имеющие более сглаженный облик, чем на панораме станции «Венера-9». В промежутках между камнями видна бугорчатая поверхность относительно более темного грунта. Тени на деталях рельефа, как и на панораме «Венеры-9», направлены в сторону аппарата, что согласуется с выводом об освещенности рассеянным светом. Глыбы на изображении выглядят относительно светлыми, поверхность между ними имеет более темную окраску. По совокупности признаков, перечисленных при характеристике панорамы «Венеры-9», эту поверхность, по-видимому, тоже следует рассматривать как поверхность относительно мелкозернистого пористого грунта.

Бортовой наклономер показал, что спускаемый аппарат станции «Венера-10» накренился на несколько градусов назад и влево. На панорамном изображении горизонт виден на обоих краях в положении, близком к равнинным модельным ситуациям. Справа линия видимого горизонта несколько длиннее, что связано со слабым левым креном аппарата. Линия горизонта в правой части панорамы двойная. Не очень четко видна линия, разделяющая поверхность и небо Венеры, а примерно на 2° ниже (ближе к телекамере) видна параллельная ей вторая, более четкая линия, вероятно связанная с местными перегибами поверхности. Детали рельефа вблизи горизонта не видны. Видимо, здесь линия горизонта достаточно удалена от аппарата. Особенности расположения линии горизонта на панораме, ее характер, а также общий облик ландшафта убеждают в том, что место посадки находится на равнине.

Можно считать, что наиболее вероятной причиной, вызвавшей наклон станции, явилась посадка видимой на панораме части ее на один из выступов коренных пород высотой 10—15 см, которые характерны для прилегающих участков (II, B2, A4, 5, 6, B6).

Исследование структуры изображения светлых образований, находящихся в поле зрения телекамеры «Венеры-10», на основании общих

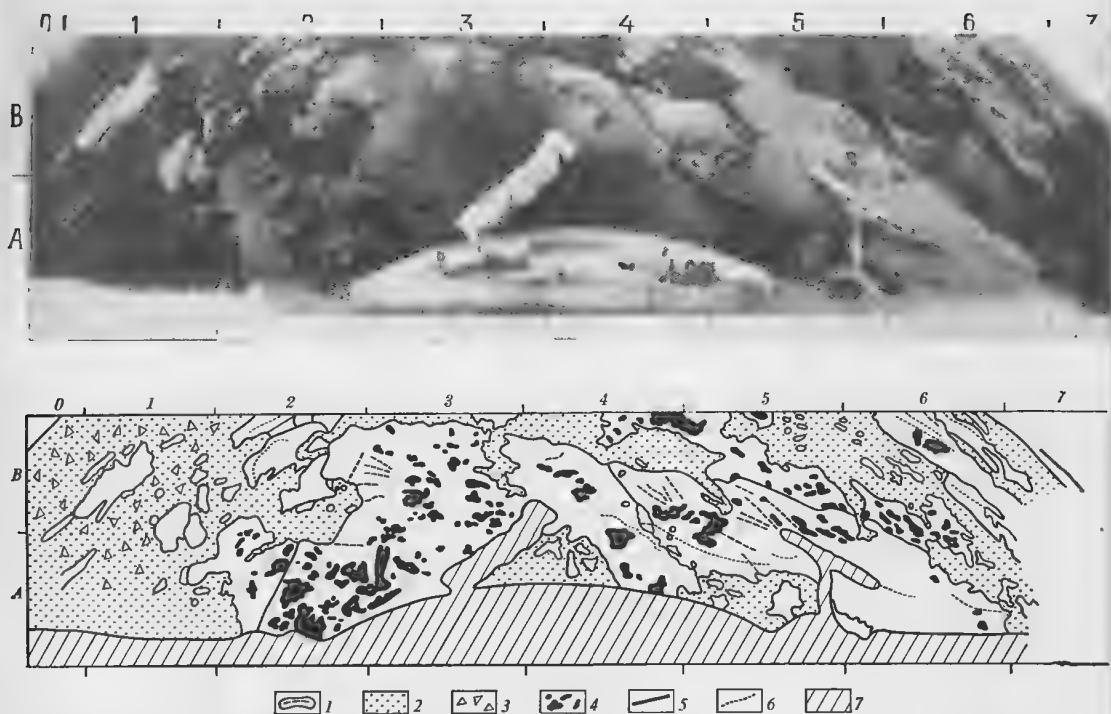


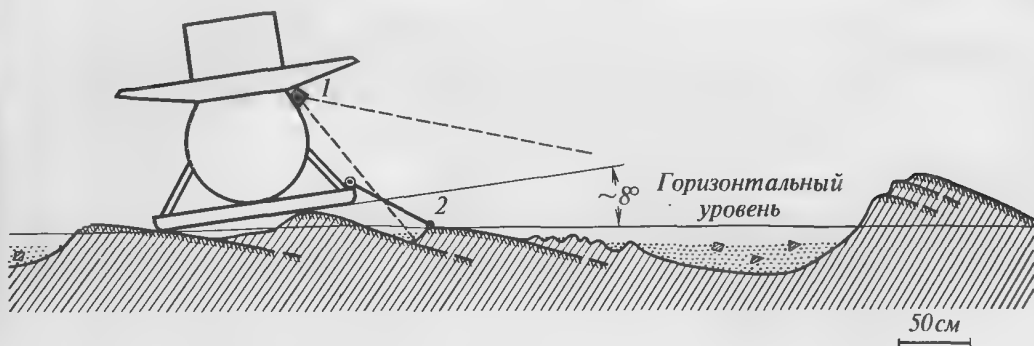
Рис. 10 Панорама станции «Венера-10» и схема дешифрирования панорамного изображения участка венерианской поверхности

1 — выходы коренных пород; 2 — грунт; 3 — нерасчлененная каменистая россыпь; 4 — ячеистые углубления на камнях; 5 — трещины; 6 — фрагменты отпрепарированных эрозий ребер на камнях; 7 — детали станции «Венера-10»

представлений позволяет идентифицировать их как глыбы относительно более светлых пород, частично погруженных в темный грунт (рис. 11).

Каменные глыбы имеют неправильную уплощенную форму — их высота над окружающей местностью существенно меньше поперечника в плане. Поверхность глыб имеет в общем источенный облик, обращает на себя внимание полосчатая структура изображения удаленных глыб в правой части панорамы (II, B6). Полосы слабо наклонны к поверхности, а верхние кромки глыб имеют более изрезанную форму по сравнению с ровными нижними.

Поперечник видимой части глыбы, на которую опустилась станция «Венера-10», составляет около 3 м. У этой глыбы неправильные очертания с «за заливами» темного цвета, заходящими внутрь ее контуров на десятки сантиметров (II B3, B5, A6), что четко видно на фоне относительно более темного грунта. В пределах глыбы отдельные участки заметно различаются характером микрорельефа. Левая часть ее, судя по фототону изображения, имеет более спокойный рельеф поверхности в масштабе десятков сантиметров, но испещрена многочисленными темны-



Положение станции «Венера-10» на поверхности и строение приповерхностного слоя, предполагаемые на основании анализа панорамы

Рис. 11

Запштрихованы коренные породы. Более густой штриховкой показаны прослои, относительно стойкие к разрушению. Темный грунт обозначен точками. Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковые. 1 — телекамера (штриховые линии, отходящие от нее, ограничивают поле зрения); 2 — датчик плотнотера

ми пятнами, очевидно мелкими углублениями, сопровождающимися близкими к ним по размеру бугорками. По тем же признакам правая часть глыбы обладает более сложным рельефом, а темные пятна — углубления — имеют большие размеры, но малочисленны. На большем удалении от камеры в правой части панорамы светлые образования имеют несколько иной облик. Границы их сильно изрезаны, а в пределах контуров видны относительно крупные диффузные темные пятна, видимо обусловленные изрезанным микрорельефом в дециметровом масштабе. Скорее всего, это образование является также неровной ячеисто-бугристой поверхностью камня. Кромка глыбы (II B5) различается на фоне этих образований как линия, разделяющая области с различным фототопом — более светлым и однородным, присущим собственно глыбе, и более темным и неоднородным, которым характеризуется ячеисто-бугристая поверхность. Таким образом, в пределах поля видимости с разрешением 1—5 см удастся выделить три типа поверхности крупных камней:

поверхность с большим количеством мелких углублений и бугорков;

неровная поверхность с отдельными крупными углублениями заливчатой формы;

ячеисто-бугристая поверхность более удаленных камней.

Ниже приводится более подробное описание выделенных разновидностей поверхности.

Часть глыбы, видимая на изображении слева, обладает относительно ровной поверхностью и испещрена многочисленными темными пятнами углублений, возможно частично заполненными грунтом, которые сочетаются с такими же по размеру бугорками. Размеры этих пятен от пределов разрешения до 3—5 см, иногда они сливаются в цепочки размером до 10—15 см (II A3). В верхней части изображения (II B3) тем-

ный «залив» с ответвлениями, углубленный в контур глыбы примерно на 30 см. Форма выемки на глыбе слева (II A2, B2) наводит на мысль о ее образовании за счет трещин, о чем свидетельствует прямолинейность ее сторон. Прямолинейная темная полоса, пересекающая глыбу (II A2) вблизи этой выемки, также может быть трещиной. Следы явного раскола глыбы видны и в ее центральной части (II A4, B4). Однако систему в расположении трещин установить трудно из-за их малочисленности.

Правая часть глыбы имеет прямолинейный гребнеобразный выступ (II A4, 5, 6), кромка которого местами разрушена (II A6), но прослеживается на большей части поперечника глыбы примерно параллельно венерианской поверхности (см. рис. 12, а). Выраженность кромки гребня, вогнутость поверхности, ограничивающей гребень снизу (II A4, A6), и относительная уплощенность второй (обращенной вверх) грани наводят на мысль об избирательном удалении материала глыбы. Создается впечатление, что гребнеобразный выступ является ребром наклонного прослоя, более стойкого к агентам разрушения, чем остальная часть камня. Наличие гребня, отпрепарированного в процессе разрушения скальной глыбы, может свидетельствовать об анизотропности породы, обусловленной составом или текстурными особенностями. Если полосчатость, присущую глыбам, располагающимся на большем удалении (II B6), интерпретировать как систему гребней, подобных описанному, и считать, что мы имеем дело с выходами коренных пород, то можно говорить об элементах расслоенности, грубо параллельной поверхности Венеры, которая характерна для пород в месте посадки. В земных условиях в изверженных породах подобное явление встречается в расслоенных массивах основных и ультраосновных пород [4].

На поверхности каменной глыбы (II A5, B5) левее плотномера наблюдаются тонкие, неявно выраженные полосы, ориентированные примерно параллельно датчику плотномера и образующие ветвящуюся систему. Эти полосы могут быть интерпретированы как ребра удлиненных выступов микрорельефа поверхности глыбы в масштабе 1—2 см. Область их видимого распространения ограничена слева трещиной (II B4), внизу описанным выше гребнем и сверху линией, разделяющей две области с различным фототопом. Не исключено, что механизм возникновения этих внешне похожих на систему прожилков выступов также обусловлен анизотропностью вещества глыбы по отношению к агентам разрушения.

Ячеисто-бугристая поверхность третьего типа (рис. 12, б) примыкает непосредственно к правой части глыбы сверху (II B5, B6). Изображение этой поверхности изобилует темными диффузными пятнами, а кромка относительно светлого камня на фоне темного грунта имеет неровную изрезанную форму. Сходные образования, незначительно поднимающиеся над поверхностью, видны на большем удалении (II A6, B6) и в более сильной перспективе, позволяющей увидеть их почти в профиль. Похоже, что они обладают сильно расчлененным ячеисто-бугристым рельефом поверхности, причем ячеистые углубления размером от нескольких до 10 см имеют неправильную, округленную или вытянутую форму и характеризуются более темным фототопом, чем светлая поверхность самих образований. Очевидно, это камни, разрушенные в более сильной степени, а упоминавшаяся выше разделительная ли-

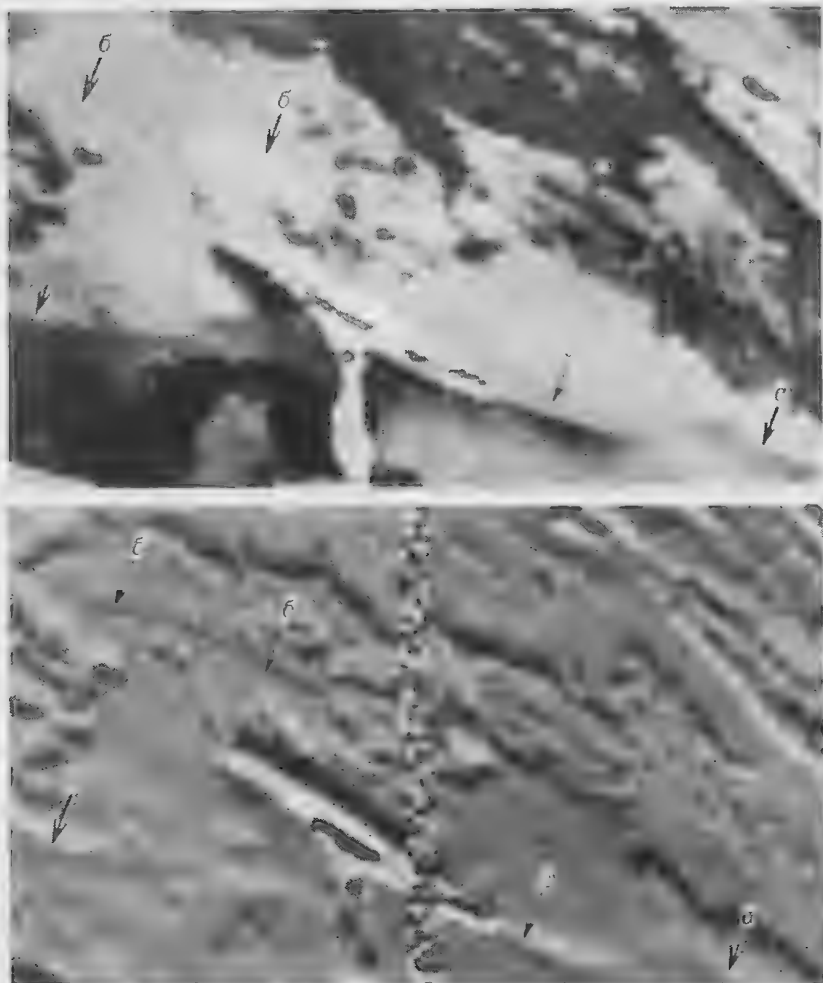


Рис. 12

Фрагмент панорамы «Венеры-10»

a — гребисообразный выступ, *b* — граница между относительно ровной и ячеисто-бугристой (на заднем плане) поверхностями. Нижнее изображение получено методом усиления местных контрастов (см. гл. VI)

ния (рис. 12, б) представляет собой кромку, ограничивающую более устойчивую к разрушению часть камня.

Возможно, различия в микрорельефе поверхности каменной глыбы обусловлены степенью ее эродированности атмосферными агентами, а поскольку трудно ожидать значительных различий во внешних условиях существования отдельных частей глыбы на поверхности, то можно предположить, что эти различия вызваны неоднородной устойчивостью пород к разрушению.

Поверхность между глыбами (грунт) на участке посадки станции «Венера-10» в общем похожа на поверхность грунта между камнями в месте посадки «Венеры-9». Из-за того, что спускаемый аппарат «Венеры-10» сел на довольно крупную каменную глыбу, поверхность грунта здесь более удалена от телекамеры (на 2 и более метров) и соответственно видна с худшим разрешением (не лучше 2—3 см). Тем не менее и на панораме «Венеры-10» различается щебенчато-комковатая структура поверхности грунта с отдельными светлыми (как крупные глыбы) камнями и менее четко выраженными пятнами бугорков (?) поперечником несколько сантиметров. Основная масса частиц грунта меньше пределов разрешения телекамеры. В левой и правой частях панорамы видно, что поверхность грунта как бы образует некоторый уровень, выше которого грунт не распространяется. Это обстоятельство согласуется с представлениями о мелкообломочном, достаточно рыхлом характере грунта. Не исключено, что за более темный цвет углублений ответственна не только их затененность, но и частичная их засыпка грунтом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Для правильной планетологической интерпретации полученных изображений необходимо учитывать природную обстановку в местах посадки [5], которая с небольшими отклонениями типична для всей поверхности Венеры [2]. Твердая поверхность сильно разогрета ($\sim 460^\circ \text{C}$) и находится в контакте с горячей плотной атмосферой существенно углекислого состава. Атмосферное давление на поверхности близко к 90 атм, что соответствует плотности атмосферного газа 60—70 кг/м³. Скорость ветра вблизи поверхности 0,3—1,3 м/с [5]. Содержание водяного пара в атмосфере составляет не более 0,1% по объему [6]. В этих условиях на поверхности исключена возможность существования жидкой воды и в качестве основных экзогенных факторов преобразования поверхности Венеры можно предполагать эоловую деятельность и химическое взаимодействие атмосферы с породами поверхности.

Анализ панорам «Венеры-9» позволяет сделать ряд новых выводов о характере поверхности Венеры и о процессах, участвующих в ее формировании. Однако прежде всего возникает вопрос о типичности или случайности наблюдаемых ландшафтов. Ранее мы упоминали о том, что, судя по интенсивности отражения радиоволн, средняя плотность материала поверхности Венеры лежит в пределах $2,3 \pm 0,4 \text{ г/см}^3$ [3]. Характерно, что средняя оценка плотности материала поверхности на участках посадки «Венеры-9» и «Венеры-10», которая складывается из взвешенных по распространенности плотностей камней и выходов скальных пород и плотности мелкообломочного рыхлого грунта, должна находиться где-то в середине этого интервала. Это обстоятельство можно рассматривать как указание на типичность наблюдаемых ландшафтов для поверхности Венеры в целом. С другой стороны, необходимо отметить, что места посадки находятся в зоне, для которой характерно наличие площадей с повышенной интенсивностью отражения (см. карту в гл. II, с. 17), и с учетом возможной неопределенности в привязке мест посадки к имеющимся картам Венеры [1] нельзя исключать вероятности того, что наблюдаемые каменистые ландшафты типичны лишь для наи-

более ярких в радарном изображении областей. Впрочем, участки с относительно высокой отражательной способностью достаточно широко распространены на поверхности Венеры и их можно рассматривать как типичный компонент в общей картине строения поверхности.

В обоих местах посадки скальные породы, проявляющиеся в виде камней или выходов коренных пород, обладают признаками грубой пластинообразной отдельности. К сожалению, этот тип отдельности весьма распространен среди горных пород Земли и в диагностическом отношении без привлечения дополнительных данных малоинформативен. Судя по измерениям уровня естественной радиоактивности в местах посадки «Венеры-9» и «Венеры-10», развитые здесь горные породы принадлежат к группе основных пород [7]. На Земле среди известных районов развития основных пород похожей пластинообразной формой обломков в осыпях обладают траппы Среднесибирского плоскогорья. Возможно, что скальные горные породы в местах посадки «Венеры-9» и «Венеры-10» представлены лавами основного состава.

Интересно отметить, что место посадки станции «Венера-8», обнаружившей заметно более высокую радиоактивность поверхности, соответствующую уровню радиоактивности кислых изверженных пород Земли [8, 9], находится в пределах области с низкой отражательной способностью в радиодиапазоне [1]. Имеющиеся данные не позволяют сделать определенных выводов о связи отражательной способности участков поверхности Венеры с составом развитых в их пределах горных пород, но уже ставят вопрос об актуальности поисков такой связи.

Для мест посадки «Венеры-9» и «Венеры-10» характерна двуслойность приповерхностного геологического разреза (рис. 13). С поверхности залегает слой относительно рыхлого обломочного материала, к которому уместно применять термин «реголит», а ниже сходятся коренные скальные породы. Такое строение разреза прямо следует из интерпретации каменных глыб на участке посадки «Венеры-10» как выступов коренных пород, а для места посадки «Венеры-9» оно предполагается исходя из того, что входящие в состав реголита остроугольные камни осыпи должны иметь близко расположенный источник питания. Мощность реголита на участке посадки «Венеры-10», очевидно, не превышает нескольких метров (в противном случае пришлось бы предполагать колоннообразное — высота больше поперечника — строение наблюдаемых на панораме выходов коренных скальных пород). В месте посадки «Венеры-9» мощность реголита оценить не удастся. Можно лишь полагать, что выше по склону в зоне питания осыпи обломками коренные породы должны выходить на поверхность, а у подножия склона должен сформироваться подсклоновый шлейф обломочного материала, мощность которого может быть достаточно большой.

В местах посадки «Венеры-9» и «Венеры-10» обращает на себя внимание структурированный щебенчатый или комковатый характер грунта. Это может быть связано с выносом пыли ветром, очищающим поверхность камней, или процессом слипания (спекания?) грунта в комочки. Возможным фактором литификации грунта может быть гидратация его атмосферным водяным паром. Термодинамические расчеты показывают, что содержащиеся в атмосфере Венеры небольшие количества водяного пара в условиях поверхности Венеры могут реагировать с минера-

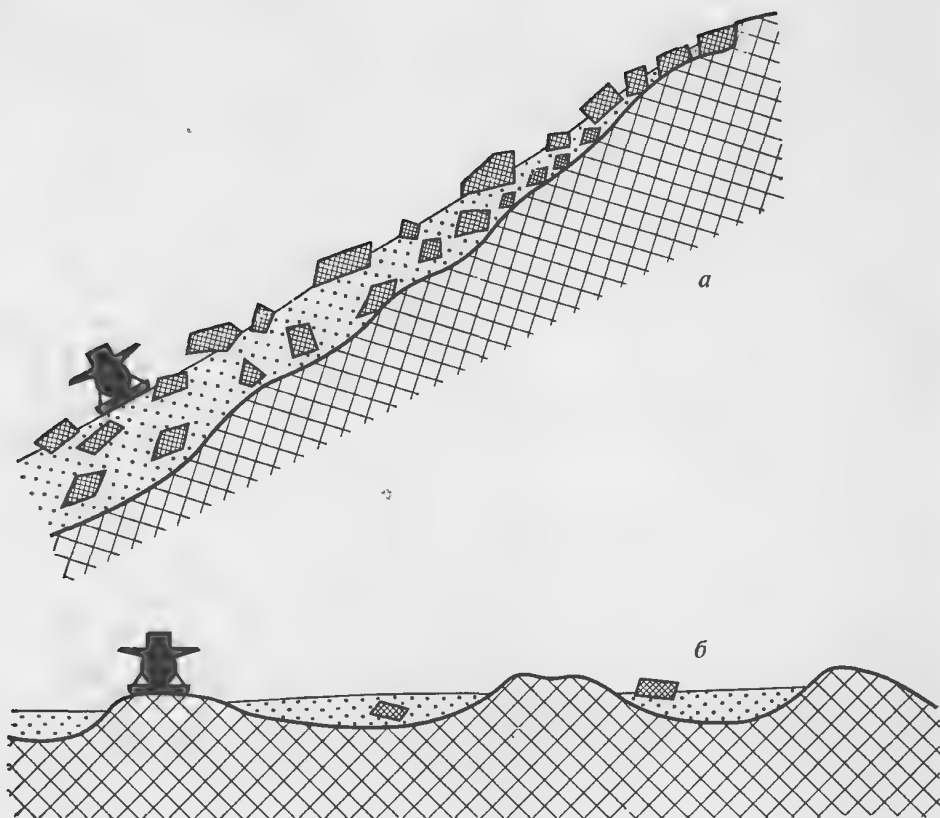


Рис. 13 Приповерхностный геологический разрез в местах посадок станций «Венера-9» (а) и «Венера-10» (б)

Заштрихованы коренные породы и их обломки. Точками показан рыхлый материал (реголит)

лами магматических пород, давая новообразования типа тремолита и других малогидратированных силикатов [10]. Возможно, «странный» камень в поле зрения телекамеры «Венеры-9» (I A6) есть результат далеко зашедшей литификации такого типа и в определенном смысле является аналогом реголитовых брекчий Луны. Из приведенного анализа панорамных изображений также следует, что, несмотря на определенное сходство в свойствах поверхности на участках посадки «Венеры-9» и «Венеры-10» (общевенерианские черты?), ландшафты этих участков по ряду важных признаков различны и свидетельствуют о проявлениях разных процессов преобразования поверхности.

Наличие крутого склона с осыпью на нем на участке посадки «Венеры-9» ставит вопрос о природе этого склона. При отсутствии жидкой воды образование весьма характерных для Земли крутых склонов водно-эрозийной природы на Венере невозможно. В ситуации, характер-

ной для участка посадки «Венеры-9», где под чехлом реголита находятся прочные коренные породы скального типа, в качестве главного агента склонообразования вряд ли можно рассматривать и дефляцию. Маловероятно также предположение о посадке «Венеры-9» на склон свежего метеоритного кратера. Дело в том, что через плотную атмосферу Венеры без существенной потери скорости могут проходить лишь очень крупные тела, образующие кратеры поперечником более 10—15 км [11]. В геологически недавнее время (а ландшафт на папоре «Венеры-9» геологически молодой!) такие события в Солнечной системе стали редки, и нам представляется методически неверным рассматривать в качестве рабочей гипотезы происхождения склона заведомо маловероятный вариант.

В качестве разумной и, по-видимому, весьма вероятной альтернативы перечисленным выше экзогенным факторам склонообразования для ситуации места посадки «Венеры-9» следует рассматривать процессы эндогенной вулкано-тектонической природы. Сейчас трудно говорить о конкретном характере предполагаемых эндогенных склонообразующих факторов (тектонический разлом?, вулканическое извержение?). Высокая температура поверхности, очевидно, должна способствовать развитию эндогенных процессов на Венере. Судя по измерениям радиоактивности поверхности аппаратами «Венера-8» — «Венера-10», породы венерианской коры имеют непримитивный дифференцированный характер [5, 7—9], что также указывает на активность эндогенных сил.

Интерпретация россыпи остроугольных камней на склоне как образования типа осыпи имеет важные следствия. Свежий, мало измененный облик камней в осыпи (а выше на примере участка посадки «Венеры-9» мы показали, что камни на поверхности Венеры разрушаются) свидетельствует о постоянном поступлении обломков из источника их питания, о движении обломков вниз по склону. Угол склона, очевидно, меньше угла естественного откоса реголита, и поэтому движение материала вниз по склону не может быть самопроизвольным, а должно быть спровоцированным. В качестве вероятных агентов провокации движения можно предполагать сейсмические толчки и воздействие ветра — прямое механическое воздействие и нарушение равновесия обломков за счет выдувания из-под них мелких фракций. Если вывод об активно живущей осыпи на участке посадки «Венеры-9» не ошибочен, то это наблюдение дает нам пример проявления на Венере склоновых процессов — столь важных для Земли и достаточно широко развитых на поверхности Луны и Марса [12, 13].

Ландшафт места посадки «Венеры-10» демонстрирует действие других процессов преобразования поверхности, которые проявляются в особенностях разрушения выходов коренных скальных пород. На поверхности каменных глыб здесь выявляются следы разрушения трех типов. Во-первых, это глубокие, прямые, почти вертикальные трещины (П А2, В4), рассекающие монолит породы и, вероятно, связанные с разрядкой тектонических или кристаллизационных напряжений. Во-вторых, это сглаживание, смягчение ребер раскола (П А5, 6), напоминающее процесс песчаной коррозии в пустынях Земли. В-третьих, это изъязвление, коррозия поверхности породы с образованием темных пятен (ямки?) (П А2, 3, В4 и т. д.), которые, видимо, в дальнейшем развитии

способны сливаться в линейные образования (II A5, B5) или крупные пятна, заполненные продуктами разрушения (II B4). Этот процесс более всего напоминает ячеистое выветривание в породах Земли, в котором преобладающая роль принадлежит химическому разрушению породы. На Венере причиной такого типа выветривания может быть химическое взаимодействие пород с малыми компонентами атмосферы, особенно с водяным паром.

Интересно отметить, что на камнях, покрывающих склон в месте посадки «Венеры-9», процессы разрушения на поверхности (венерианское выветривание) почти не проявились. Здесь следы корразии можно подозревать лишь в некоторой округленности камней около датчика гамма-плотнмера (I A5, 6), а следы коррозии — в нечетко выраженной пятнистости некоторых камней (I A3, B4, A5). Этим обстоятельством подтверждается активный развивающийся характер склона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Панорамные изображения, переданные со спускаемых аппаратов станций «Венера-9» и «Венера-10», открыли нам новый мир — показали, как выглядит поверхность планеты Венера. Посадка в двух участках поверхности привела к открытию несколько различающихся ландшафтов. Оказалось, что эти ландшафты не обнаруживают каких-либо особых черт, резко отличающихся от ландшафтов Земли. Напротив, в них просматриваются аналогии с определенными ландшафтами земной поверхности — осыпные склоны гор в аридной зоне, пенешлен с близким залеганием коренных пород в центральноказахстанских степях или на плоскогорных участках кольских тундр. Это обстоятельство вселяет уверенность в том, что опыт и методы земной геологии (в широком смысле этого слова) применимы к изучению поверхности Венеры.

Наличие крутого склона, покрытого россыпью остроугольных камней, свидетельствует о геологической молодости ландшафта на участке посадки «Венеры-9». Причиной формирования такого ландшафта, по-видимому, могли быть процессы вулкано-тектонической природы. Равнинный характер местности и проявления процессов выветривания каменных глыб свидетельствуют о зрелости ландшафта на участке посадки «Венеры-10». Обоим ландшафтам присуща довольно высокая каменистость поверхности, что хорошо согласуется с радиолокационными оценками средней плотности материала поверхности Венеры ($2,3 \pm \pm 0,4$ г/см³ по [1]) и позволяет считать эти ландшафты достаточно типичными для Венеры. Следует отметить, что понятия молодости и зрелости ландшафта употребляются здесь только в относительном смысле и ничего не говорят об абсолютном возрасте или скорости процессов. Оправданием такой осторожности может служить геологическая свежесть многих элементов лунного рельефа, имеющих возраст в миллиарды лет.

Общая высокая каменистость поверхности Венеры (если она действительно имеет место) может служить указанием на слабую интенсивность процессов разрушения и переноса материала поверхности и на малую вероятность формирования мощных толщ осадочных пород. Об интенсивности эндогенных процессов по имеющимся сейчас данным су-

дить трудно. Заметим лишь, что известная сглаженность поверхности Венеры в глобальном масштабе [1] не противоречит выводу о возможной вулcano-тектонической деятельности на этой планете и может быть связана с повышенной пластичностью разогретой коры Венеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rumsey H. C., Morris G. A., Green R. R., Goldstein R. M. A Radar brightness and altitude image of a portion of Venus.— *Icarus*, 1974, 23, N 1, 1—7.
2. Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера. М.: Наука, 1974.
3. Кротиков В. Д. Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны.— *Изв. вузов. Радиопизика*, 1962, № 5, № 6.
4. Уэйджер Л., Браун Г. Расслоенные изверженные породы. М.: Мир, 1970.
5. Аведеевский В. С., Ишевский В. Е., Маров М. Я., Мороз В. И. Выдающийся успех советской космонавтики.— *Правда*, 21 февр. 1976, № 21021.
6. Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Флоренский К. П., Андрейчиков Б. М. Определение химического состава атмосферы Венеры межпланетной станцией «Венера-4». — Докл. АН СССР, 1968, № 1.
7. Виноградов А. П., Флоренский К. П. Рассказывают панорамы.— *Правда*, 4 ноября 1975, № 20912.
8. «Венера-8». Итоги космического рейса.— *Правда*, 10 сент. 1972, № 254.
9. Виноградов А. П., Сурков Ю. А., Курнозов Ф. Ф., Глазов В. Н. Содержание естественных радиоактивных элементов в венерианской породе по данным автоматической станции «Венера-8». — *Геохимия*, 1973, № 1.
10. Lewis J. S. Venus: Atmospheric and lithospheric composition.— *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1970, 10, 73—80.
11. Петров Г. И., Стулов В. П. Движение больших тел в атмосферах планет.— *Космич. исслед.*, 1975, 13, № 4.
12. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Иванов А. В. Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности.— В кн.: *Космохимия Луны и планет*. М.: Наука, 1975, с. 439.
13. Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Кузьмин Р. О., Черная И. М. Результаты геолого-морфологического анализа некоторых фотографий марсианской поверхности, полученных автоматическими станциями «Марс-4» и «Марс-5». — *Космич. исслед.*, 1975, 13, № 1, 67.

НЕКОТОРЫЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ



На спускаемых аппаратах «Венеры-9» и «Венеры-10» было впервые получено изображение поверхности Венеры. Предварительный анализ опубликованных панорамных изображений позволяет сделать некоторые выводы не только о строении поверхности, но и о свойствах приповерхностного слоя атмосферы.

На обоих панорамных кадрах (см. рис. 10, гл. VI) справа сверху виден участок линии горизонта. На первой панораме расстояние до горизонта по оценке, основанной на видимости камней, составляет всего несколько десятков метров [1]. На второй оно не может превышать нескольких сот метров по той причине, что является достаточно резким: релейевская оптическая толща, равная единице, соответствует вблизи поверхности Венеры геометрическому расстоянию около 1 км, и горизонт должен сливаться с атмосферой, если расстояние до него порядка 1 км или больше.

При высоте панорамной камеры над поверхностью около $z_0 = 1$ м расстояние до геометрического горизонта

$$l_0 = \sqrt{2Rz_0} \approx 3,5 \text{ км.} \quad (1)$$

Если зависимость плотности от высоты определяется барометрической формулой, то имеет место нормальная рефракция ($d\mu/dz < 0$), которая увеличивает расстояние до горизонта:

$$l \gg l_0. \quad (2)$$

Было показано [2, 3], что в условиях венерианской атмосферы при нормальной рефракции расстояние до горизонта достигало бы нескольких тысяч километров и сопровождалось бы поднятием линии горизонта до 10° . Поскольку линия горизонта видна, очевидно $l < l_0$ и имеет место аномальная рефракция:

$$d\mu/dz > 0. \quad (3)$$

Аномальная рефракция, по-видимому, связана с наличием небольшого температурного скачка вблизи поверхности (уменьшение температуры на высоте 1 м), порядок величины которого нетрудно оценить, зная порядок величины l . Формула (2) при большой величине аномальной рефракции непригодна. Мы использовали равенство

$$l = r\alpha, \quad (4)$$

где r — радиус кривизны луча:

$$r = \frac{Rz_0}{R - (R_0 + z_0) \sin i} \approx \frac{z_0}{1 - \sin i}, \quad (5)$$

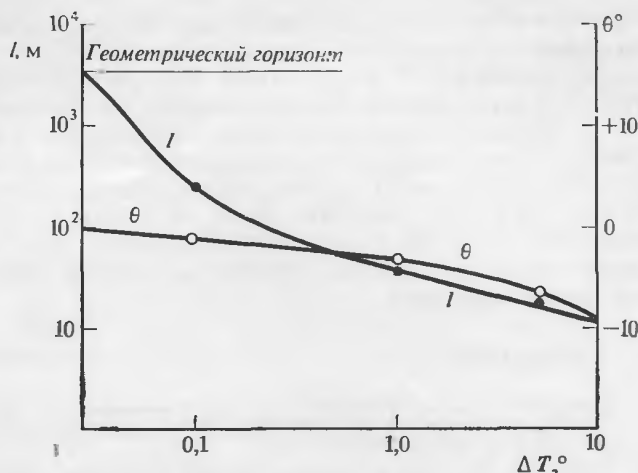


Рис. 1

Дальность l и возвышение θ горизонта на Венере в зависимости от величины разности температур ΔT в приповерхностном слое толщиной 1 м

угол α определяется равенством

$$\sin \alpha = \cos i \frac{R + z_0}{R + z},$$

i — угол между вертикалью и направлением на видимый горизонт, определяемый уравнением

$$(z_0 + R) \left(\mu + \frac{d\mu}{dz} z_0 \right) \sin i = \mu R. \quad (6)$$

Величина $d\mu/dz$ и градиент температуры связаны уравнением

$$\left(\frac{d\mu}{dz} \right)_{z=0} = - \frac{\mu_0}{T} \frac{dT}{dz} \left(\frac{mg}{k dT/dz} - 1 \right), \quad (7)$$

где m — масса молекулы, g — ускорение силы тяжести, k — постоянная Больцмана.

На рис. 1 приведена зависимость расстояния до горизонта и угла понижения горизонта от величины температурного скачка

$$\Delta T = \frac{dT}{dz} z_0, \quad (8)$$

где $z_0 = 1$ м.

Из сопоставления кривых, приведенных на этом рисунке, с панорамными кадрами «Венеры-9» и «Венеры-10» можно сделать следующие выводы.

1. Величина $\Delta T \approx 1^\circ$ может быть согласована с близким расстоянием до горизонта, наблюдаемым на панораме «Венеры-9». Здесь не исключена и другая возможность — приближение горизонта из-за выпуклой геометрической формы поверхности в месте посадки. Однако обе

гипотезы кажутся нам равноправными. Если верна вторая, то наша оценка может рассматриваться как верхняя граница.

2. Величина $\Delta T \approx 0,1^\circ$ может быть согласована с фактом видимости достаточно резкой линии горизонта на панораме «Венеры-10».

3. Вероятно, средняя величина $(dT/dz)_{z=0} = 0$ вблизи поверхности Венеры может меняться в пределах от нескольких сотых долей градуса до нескольких десятых долей и более в зависимости от локальных условий. Это может приводить к тому, что в разных местах (и даже в одном и том же месте в разных направлениях) расстояние до горизонта может резко различаться. Очевидно, должны иметь место и сильные временные вариации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. П., Флоренский К. П., Базилевский А. Т., Селиванов А. С. Первые панорамы Венеры (предварительный анализ изображений).— Письма в Астрон. ж., 1976, 2, № 2, 67—71.
2. Скотников М. М. О рефракции света в атмосфере Венеры.— Космич. исслед. 1969, 7, 436.
3. Snyder C. W. Some consequences of critical refraction in the Venus atmosphere. Symposium N 40 IAU «Planetary atmospheres». C. Sagan, T. C. Owen and H. J. Smith (Eds). D. Reidel Publ. Co., Dordrecht — Holland, 1971, p. 36.